

**JACQUES GIMENES**

**ANÁLISE DA GERAÇÃO, RECUPERAÇÃO E DESTINAÇÃO DE  
CINZAS EM CALDEIRAS – O CASO DE UMA INDÚSTRIA**

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção de título de Especialista em Economia e Meio Ambiente pelo Departamento de Economia Rural e Extensão do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Charles Carneiro

**CURITIBA  
2012**

*“Ao abrir portas também entramos”*  
José Pedrebon

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas  
que mais me ajudaram a chegar até aqui,  
não só como Engenheiro, mas também como

Pessoa:

Meu Pai, **José Gimenes Filho**, um empreendedor nato  
que construiu uma vida pautada na honestidade e no trabalho,  
sendo um grande exemplo para todos que o conhecem;

Minha Mãe, **Marilene dos Anjos Gimenes**, a própria materialização do Amor;  
Minha Esposa, **Mônica Rosa de Oliveira Gimenes**, que com carinho e ternura  
esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis dos últimos 10 anos.

À minha Filha...que no sorriso traz a doçura e a beleza da vida.

*Dedico!*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade da vida...

Não poderia deixar de agradecer, também, a dois grandes Engenheiros Químicos que balizaram minha vida profissional: os papeteiros Luiz Tadeu Perussolo e Cesar Augusto de Oliveira Souza.

Agradeço de coração ao amigo Biólogo Anderson Luiz Wittmann pelas contribuições neste e em diversos trabalhos e decisões dos últimos anos.

À Jeferson Beccari Malheiros e Robson Keller Nunes pela ajuda com análises, testes, coleta de informações e participação nas discussões dos temas levantados.

Agradeço aos operadores da Caldeira 2, gente que ao longo das últimas décadas tem feito um trabalho excelente, trabalhando de forma segura, rentável e desenvolvendo operadores de caldeira para diversas plantas da região.

Ao Engenheiro Agrônomo Cristhian Ribas Sékula pelas informações a respeito do desempenho das áreas agricultáveis da empresa após a aplicação das cinzas. Seu estudo foi de grande valia para o desenvolvimento deste trabalho.

À UFPR, assim como a estrutura do Curso “Especialização em Economia e Meio Ambiente – Ênfase em Negócios Ambientais”, que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao competente Professor Dr. Charles Carneiro por ter aceitado participar desta proposta, que acredito ajudar o Setor de Geração de Vapor e Cogeração de energia elétrica.

À Santa Maria pelo suporte e pelas oportunidades que me desafiam diariamente a aprender e inovar.

Aos meus companheiros de Utilidades com quem aprendo constantemente, seja no campo técnico seja nas belas experiências de vida.

E, claro, não poderia deixar de agradecer à minha Esposa, Mônica, que me ensinou na prática o significado da expressão “endurecer sem jamais perder a ternura”.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>viii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
2.1 Objetivo Geral .....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	13
<b>3 JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>14</b>
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
4.1 A Problemática Ambiental .....	15
4.2 Resíduos Sólidos – Legislação Brasileira .....	17
4.3 Geração de Energia com Biomassa .....	18
4.3.1 Geração de Vapor .....	18
4.3.2 Constituição da Biomassa .....	20
4.3.3 Constituição das Cinzas.....	20
4.3.4 Combustão Industrial.....	22
4.3.5 Geração de Cinzas em Caldeira de Biomassa.....	26
4.3.6 Caldeiras de Biomassa.....	27
4.4 Alternativas para Destinação de Resíduos de Queima (cinzas).....	30
4.4.1 Aterro Sanitário.....	30
4.4.2 Agricultura.....	32
4.4.3 Utilização em Outros Segmentos.....	35
4.4.3.1 Compostagem.....	35
4.4.3.2 Indústria Cerâmica.....	36
4.4.3.3 Construção Civil.....	36
4.4.4 Análise Comparativa entre as Formas de Destinação de Cinzas.....	37
4.5 O Ponto de Vista do Passivo Ambiental .....	38
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
5.1 Caracterização da Área de Estudo.....	40
5.2 A Caldeira Estudada .....	42
5.2.1 Reinjetores de Cinzas .....	43
5.2.1.1 Remoção de cinzas nas moegas.....	43
5.2.1.2 Remoção de Cinzas nos Pré-aquecedores de Ar e Economizador.....	43

5.2.2	Retentores de Cinzas (Controle de Emissões).....	45
5.2.3	Reinjetores x Retentores de Cinzas.....	49
<b>5.3</b>	<b>Determinação da Massa Específica (densidade), Umidade e Teor de Cinzas .....</b>	<b>50</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise da Biomassa e seus Efeitos na Geração de Cinzas .....</b>	<b>51</b>
<b>5.5</b>	<b>Análise e Quantificação de Cinzas Retidas nos Multiciclones .....</b>	<b>54</b>
<b>5.6</b>	<b>Análise de Perda de Cinzas como Material Particulado.....</b>	<b>55</b>
<b>5.7</b>	<b>Quantificação das Escórias .....</b>	<b>55</b>
<b>5.8</b>	<b>Balanço Mássico de Cinzas na Caldeira 2.....</b>	<b>56</b>
<b>5.9</b>	<b>Disposição de Cinzas e Análise do Solo .....</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
6.1	Análise da Biomassa e seus Efeitos na Geração de Cinzas .....	61
6.2	Análise e Quantificação de Cinzas Destinadas a Agricultura.....	64
6.3	Geração de Escórias: Possíveis Causas .....	66
6.4	Análise da Perda de Cinzas como Material Particulado.....	68
6.5	Balanço das Cinzas Geradas na Caldeira.....	69
6.6	Disposição de Cinzas no Solo e Análises Químicas .....	73
6.7	Minimização da Geração de Cinzas .....	74
6.7.1	Redução da Geração de Cinzas .....	74
6.7.2	Reutilização das Cinzas como Combustível na Caldeira (reinjeção) .....	76
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>78</b>
<b>8</b>	<b>PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>89</b>
	<b>A1 – GLOSSÁRIO .....</b>	<b>89</b>
	<b>A2 – Tabela de Resultados – Influência na Geração de Cinzas .....</b>	<b>92</b>
	<b>A3 – Resultados da Análise de Cinzas .....</b>	<b>93</b>
	<b>A4 – Imagens das cinzas da Caldeira .....</b>	<b>96</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO 01 – PROPRIEDADES E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO .....</b>	<b>97</b>
	<b>ANEXO 02 – PADRÕES DE EMISSÕES GASOSAS (SEMA 054/06).....</b>	<b>97</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PORTA DE FORNALHA APRESENTANDO O CAVACO EM COMBUSTÃO. ....	19
FIGURA 2 – ETAPAS DE COMBUSTÃO DA MADEIRA .....	25
FIGURA 3 – ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UMA CALDEIRA DE COGERAÇÃO. .	27
FIGURA 4 – CALDEIRA VERTICAL COM GRELHA ROTATIVA PARA COMBUSTÃO DE BIOMASSA. .....	28
FIGURA 5 – CORTE DA SEÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO. ....	31
FIGURA 6 – VISÃO GERAL DA PLANTA MOSTRANDO AO FUNDO A CALDEIRA DE FORÇA. ....	41
FIGURA 7 – CALDEIRA 2 VISTA DA SEÇÃO DE EXAUSTÃO .....	42
FIGURA 8 – CIRCUITO DE GASES APRESENTANDO OS TUBOS DO SUPERAQUECEDOR .....	43
FIGURA 9 – SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE CINZAS POR ROSCAS ROTATIVAS.....	44
FIGURA 10 – VENTILADOR REIJETOR DE CINZAS E ROSCA TRANSPORTADORA.....	45
FIGURA 11 – VISÃO GERAL DA SEÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE CINZAS: À ESQUERDA OS REINJETORES E A DIREITA OS MULTICICLONES.....	45
FIGURA 12 – VISTA INTERNA DOS MULTICICLONES.....	46
FIGURA 13 – REMOÇÃO DE CINZAS NOS MULTICICLONES .....	47
FIGURA 14 – VÁLVULA ROTATIVA DO PA 55A QUE APRESENTAVA DESGASTE (FLECHAS). ...	48
FIGURA 15 – ARMAZENAMENTO DE BAGS NO PÁTIO DA CALDEIRA 2.....	49
FIGURA 16 – MEDIDOR PORTÁTIL DE GASES MOD. SPRINT 2000 DA CONFOR. ....	52
FIGURA 17 – ESCÓRIA EM FORMA DE “CASCÕES” RETIRADA DO CINZEIRO DA CALDEIRA 2.	56
FIGURA 18 – CINZEIRO DA CALDEIRA 2 E CARRINHO DE TRANSPORTE E QUANTIFICAÇÃO DE ESCÓRIA.....	56
FIGURA 19 – MACROFLUXO DO SISTEMA DE GERAÇÃO, RECIRCULAÇÃO E EMISSÃO DE CINZAS. ....	57
FIGURA 20 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA APLICAÇÃO DE CINZAS NAS TERRAS.....	59
FIGURA 21 – CINZAS SENDO APLICADAS EM TERRAR AGRÍCOLAS.....	59
FIGURA 22 – PROPORÇÃO ENTRE AS CINZAS PRESENTES NO BALANÇO DE MASSA. ....	70
FIGURA 23 – REDUÇÃO DE CINZAS AO LONGO DA SEÇÃO DE GASES DA CALDEIRA.....	72
FIGURA 24 – CINZAS DA CALDEIRA DISPOSTAS EM BAGS.....	96
FIGURA 25 – REDUÇÃO DE CINZAS AO LONGO DA SEÇÃO DE GASES DA CALDEIRA.....	96

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ANÁLISE DE CINZA DE CALDEIRA .....	21
TABELA 2 – REAÇÕES GLOBAIS DE COMBUSTÃO.....	24
TABELA 3 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE CAVACOS DE <i>PINUS TAEDA</i> .....	53
TABELA 4 – CINZAS APLICADAS POR HECTARE EM 2011 .....	58
TABELA 5 – RESULTADOS ALCANÇADOS NA MLCV AGRICULTURA APÓS APLICAÇÃO DE CINZAS .....	60
TABELA 6 – CORRELAÇÃO LINEAR PARA ALGUMAS VARIÁVEIS RELACIONADAS AO PROCESSO DE GERAÇÃO DE CINZAS .....	62
TABELA 7 – TEMPERATURA DA FORNALHA E UMIDADE DA BIOMASSA NA CALDEIRA 2 .....	63
TABELA 8 – ANÁLISE PARCIAL DO TEOR DE CINZAS EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA .....	64
TABELA 9 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA BÁSICA DO RESÍDUO DE QUEIMA .....	65
TABELA 10 – QUANTIFICAÇÃO DAS CINZAS RETIDAS NOS MULTICICLONES.....	66
TABELA 11 – QUANTIFICAÇÃO DAS CINZAS RETIRADAS DO CINZEIRO (ESCÓRIA).....	67
TABELA 12 – AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS NA GERAÇÃO DE ESCÓRIA .....	68
TABELA 13 – QUANTIFICAÇÃO DAS CINZAS EMITIDAS ATRAVÉS DA CHAMINÉ.....	68
TABELA 14 – BALANÇO GLOBAL DAS CINZAS NA CALDEIRA 2.....	70
TABELA 15 – BALANÇO GLOBAL E REINJETOS DAS CINZAS NA CALDEIRA 2 (GASES) .....	71
TABELA 16 – RESULTADOS DIÁRIOS DA ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE CINZAS	92
TABELA 17 – ANÁLISE ELEMENTAR E DE CONTAMINANTES DAS CINZAS (SOLUBILIZADO) ....	93
TABELA 18 – ANÁLISE ELEMENTAR E DE CONTAMINANTES DAS CINZAS (AMOSTRA BRUTA) .....	93
TABELA 19 – ANÁLISE ELEMENTAR E DE CONTAMINANTES DAS CINZAS (LIXIVIADO).....	94
TABELA 20 – ANÁLISE DE PRESENÇA DE SALMONELLA E COLIFORMES .....	94
TABELA 21 – ENSAIO PARA DETECÇÃO DE VÍRUS.....	95
TABELA 22 – BIOENSAIO DE TOXIDADE AGUDA COM <i>Vibrio fischeri</i> (SOLUBILIZADO).....	95
TABELA 23 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO DE ACORDO COM O PH .....	97
TABELA 24 – PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA PARA PROCESSOS DE GERAÇÃO DE CALOR OU ENERGIA – DERIVADOS DE MADEIRA.....	97

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – CRONOLOGIA DOS EVENTOS RELEVANTES RELACIONADOS ÀS QUESTÕES AMBIENTAIS.....	16
QUADRO 2 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE ALGUNS TIPOS DE BIOMASSA.....	20
QUADRO 3 – PODER CALORÍFICO DE AMOSTRAS DE <i>PINUS TAEDA</i> .....	23



## RESUMO

A evolução da consciência ambiental da sociedade nas últimas décadas levou a indústria a utilizar novas práticas com relação à destinação de resíduos sólidos. Nesse cenário, as cinzas de caldeira, material com elevado teor de óxidos metálicos e algum residual de matéria orgânica, perdem a característica de passivo ambiental e assume lugar de insumo produtivo e matéria prima. O objetivo deste trabalho foi avaliar a geração, retenção e destinação de cinzas em uma caldeira de biomassa. Para obtenção, quantificação e classificação das cinzas e influências em sua geração, foram coletados dados de processo, amostras da biomassa (cavaco de *Pinus taeda*) e cinzas do cinzeiro e multiciclones da Caldeira 2. As influências na geração de cinzas foram analisadas por correlação linear de Pearson. O resíduo foi classificado como Classe IIA, podendo ser disposto em atividades agrícolas. A aplicação de cinzas do cinzeiro e multiciclones, com potencial de geração de 750 t/ano, na agricultura resultou em aumento de 4,3% no pH do solo, além de aumento expressivo na concentração de Ca (9,3%), K (36,6%) e Mg (41,6%). O balanço mássico na caldeira mostrou que 61% das cinzas foram retidas nos multiciclones, 31% foram retiradas do cinzeiro e 8% foram emitidas na chaminé (eficiência dos multiciclones ficou em 88,2%). Do total de cinzas volantes, 67,2% foram reinjetadas na fornalha. A análise das cinzas dos multiciclones mostrou que 56,3% em massa era carvão vegetal, podendo retornar para a fornalha, reduzindo em 465 t/ano a necessidade de cavaco de pinus e em 20,1% a geração de resíduos de queima. As caldeiras devem ser controladas de forma a reduzir a geração de cinzas, seja reutilizando a fração de incombustos na própria caldeira ou ajustando os parâmetros de umidade e granulometria da biomassa, excesso de ar e temperatura da fornalha. O gerenciamento dos resíduos de queima gerados deve ser tal que não onere a empresa ou prejudique o meio ambiente. A aplicação na agricultura se mostrou uma destinação que atende estes dois requisitos.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos, Cinzas de Caldeira e Combustão Industrial.

## **ABSTRACT**

*The evolution of environmental awareness in society in recent decades has led the industry to use new practices regarding the disposal of solid waste. In this scenario, the boiler ash, material with high content of metal oxides and some residual organic matter, lose their characteristic of environmental liabilities and assumes the place of production input and raw material. The objective of this study was to evaluate the generation, retention and disposal of ashes in a biomass boiler. To obtaining, quantification and classification of ash and influences in his generation, process data were collected, samples of biomass (wood chips of *Pinus taeda*) and ashes from the ashtray and multi-cyclones Caldeira 2. The influences on the generation of ash were analyzed by Pearson's correlation. The residue was classified as Class IIA and can be applied in agricultural activities. The application of ash from the ashtray and multi-cyclones, with potential for generation of 750 ton / year in agriculture, resulted in 4.3% increase in soil pH, as well as significant increase in the concentration of Ca (9.3%), K (36.6%) and Mg (41.6%). The mass balance in the boiler showed that 61% of the ashes were retained in the multi-cyclones, 31% were removed in the ashtray and 8% ash were emitted in the chimney (multi-cyclones efficiency remained at 88.2%). Of total fly ash, 67.2% were reinjected into the furnace. The analysis of the ashes of multi-cyclones showed that 56.3% mass was charcoal, may be returned to the furnace, reducing 465 tons / year of the chip pine demand and 20.1% in the generation of waste burning. The boilers must be controlled in order to reduce the generation of ashes, reusing fraction of unburnt in the boiler or by adjusting the parameters of humidity and particle size of the biomass, excess air and furnace temperature. The management of waste generated from burning must be such as not to encumber for the company or harm the environment. The application in agriculture proved to be a destination that meets these two requirements.*

**Keywords:** Solid Waste, Boiler Ashes and Industrial Combusting.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a degradação do meio ambiente passou a preocupar os diversos setores da sociedade, deixando de ser assunto restrito aos meios acadêmico e científico para figurar entre as grandes questões da agenda internacional. Assuntos como a destruição das florestas, contaminação dos rios, geração de rejeitos, aumento de dióxido de carbono na atmosfera e efeito estufa passaram a ser motivo de preocupação pelos governos, organizações, ambientalistas, indústrias e sociedade de maneira geral.

Nesse cenário, a questão da geração e destinação dos resíduos é de elevada importância, uma vez que envolve e promove: desperdício de matérias primas, contaminação do solo e das águas, geração de gases do efeito estufa, aumento de consumo de recursos naturais, perda de competitividade, entre outros. De acordo com RIBEIRO (2010 p.13) os resíduos “por possuírem materiais sobre os quais se tem cada vez mais interesse de análise devido a sua relação com a questão de proteção do meio ambiente, seja pelo espaço que ocupam, seja por suas composições físico-químicas, vem sofrendo ao longo dos anos um disciplinamento legal cada vez mais rigoroso”. Neste sentido, cada vez se faz mais presente os conceitos de redução, reutilização e reciclagem de resíduos, não apenas como uma questão financeira e de redução de passivos ambientais, como também do fortalecimento da imagem das empresas. (RIBEIRO, 2010, p.9)

O ambiente competitivo no qual as empresas passaram a atuar após a globalização, tornou necessária a mudança na forma das empresas cuidarem de sua estratégia. BRUNSTEIN e BUZZINI (1999, p. 2) citam importância da estratégia das empresas estarem alinhadas com as estratégias ambientais.

SANCHES (2000, p. 5) traz um levantamento de algumas vantagens e ganhos da empresa com foco em meio ambiente, no que tange às questões de resíduos:

- Menor utilização de energia nos processos produtivos;
- Menor utilização de matérias primas devido minimização de perdas;
- Desenvolvimento de novos produtos e criação de novos mercados;

- Melhoria da imagem frente à opinião pública e órgãos governamentais.

Os dados do Balanço Energético Nacional 2010 (BEN, 2010) mostraram que a matriz energética brasileira está com mais de 30% de participação da biomassa. Segundo dados do *PEW Environmental Group* (2011), o Brasil aumentou em 1,9 GW sua capacidade instalada de energia de biomassa. Do ponto de vista ambiental, é muito importante que os rejeitos advindos da geração de energia com biomassa, em particular as cinzas, sejam utilizados de forma harmoniosa com o meio ambiente.

De acordo com SÉKULA (2011) uma das justificativas para a utilização de resíduos de queima (cinzas de caldeira) na agricultura é o fato de a maior parte da agricultura nacional ser dependente de fertilizantes químicos que são derivados de fontes não renováveis. Ainda segundo o autor, o Brasil não é independente na fabricação de seus fertilizantes, onerando desta forma toda a cadeia produtiva.

Conforme MAEDA, SILVA e MAGALHÃES (2007, p.1) “a grande quantidade de resíduos geradas em caldeira pela queima de biomassa florestal de indústria de celulose e papel vem provocando preocupações ambientais e econômicas”.

Diversos trabalhos foram realizados utilizando os resíduos de queima de biomassa como corretivo de solo (acidez), compostagem, substrato de mudas e fonte auxiliar de nutrientes (WITTMANN, 2010; SÉKULA, 2012). LIMA *et al* (2005) associaram as cinzas ao lodo de esgoto como fertilizantes em plantações de algodão. Já VASCONCELLOS *et al* (2004) utilizaram as cinzas de caldeira em misturas asfálticas e em argamassas de cimento *Portland*, obtendo bons resultados. A utilização de cinzas na indústria cerâmica foi amplamente estudada, como, por exemplo, no trabalho de RIBEIRO (2010) e BORLINI *et al* (2005). É encontrada ainda aplicação das cinzas como matéria prima para fabricação de carvão ativado.

Tendo em visto os aspectos abordados neste item, vê-se grande potencial para uma maior e melhor reutilização dos rejeitos de queima. A simples destinação como resíduo, seja em aterros ou similares, deixa de agregar valor às cinzas de caldeira, com prejuízos às empresas e ao meio ambiente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar e quantificar a geração, reutilização e destinação agrícola de resíduos de queima (cinzas) em caldeira de cavaco de madeira em uma indústria de Papel e Celulose, município de Guarapuava, Paraná.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar o passivo ambiental que constitui os resíduos de queima (cinzas) e fazer a caracterização destes resíduos;
- Estudar fatores que influenciam na geração de cinzas no processo de combustão de cavaco;
- Propor formas de redução de cinzas na queima de cavaco;
- Avaliar o potencial econômico da reutilização de parte das cinzas na caldeira de cavaco;
- Avaliar a emissão de material particulado na chaminé da caldeira;
- Avaliar um caso de aplicação das cinzas em solos agricultáveis.

### 3 JUSTIFICATIVAS

O Brasil em 2011 se tornou o país com maior capacidade instalada para geração por biomassa (madeira, bagaço, resíduos agrícolas, etc.), segundo dados do PEW Environmental Group (2011). Este resultado é fruto das políticas governamentais nas últimas décadas de incentivo a plantação de florestas energéticas (BRAND, 2007) e cana de açúcar. Dessa forma, o país tem um grande passivo que são as cinzas geradas na combustão da biomassa de geração de energia. O trabalho busca alternativas para minimizar os impactos negativos deste volume de cinzas.

Além da geração de cinzas para a produção de energia termelétrica, o Brasil possui também grande capacidade no Setor da Indústria. A grande maioria dos processos industriais utiliza vapor ou fluido térmico para aquecimento, sendo que esta energia é recebida através da queima de combustíveis. No caso de combustíveis sólidos são gerados resíduos, denominados cinzas, onde os grandes volumes, normalmente entre 0,2% (cavaco de *Pinus taeda* e *Eucalyptus sp.*) e 20% (palha de arroz) do material queimado, tornam-se um problema ambiental e financeiro para as empresas.

Utilizando dados do Balanço Energético Nacional (BEN 2010) os resíduos de biomassa, apenas no Setor de Papel e Celulose, geram um volume da ordem de 300.000 t (580.000 m<sup>3</sup>) de material para produção de papel (0,50% em massa da biomassa consumida) e celulose (0,75% da madeira consumida). Considerando toda a biomassa consumida para energia no Brasil este número multiplica por cinco ou mais. Este volume se não gerenciado corretamente pode se tornar um passivo ambiental oneroso às empresas. O custo de utilização de Aterro Sanitário para este tipo de material (Classe II A – Não perigoso / Não inerte) é de cerca de R\$ 200,00/m<sup>3</sup>, ou seja, a destinação de cinzas chegaria a custar R\$ 115 milhões anuais apenas para o Setor de Celulose e Papel. Lembrando ainda que, em função do volume, a destinação em aterros poderia não ser tecnicamente viável. No entanto, é possível utilizar este resíduo de forma positiva para o meio ambiente e para o balanço financeiro das empresas.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 A Problemática Ambiental

Desde os tempos mais remotos, a presença humana no planeta tem trazido impacto ao meio ambiente (PIOTTO, 2003 p. 4). No entanto, a degradação ambiental só foi percebida nas últimas décadas. O Quadro 1 apresenta algumas das principais ocorrências relativas ao meio ambiente nas últimas cinco décadas.

Com a constatação dos problemas modernos, superpopulação, crescimento econômico não sustentado, ocorrência de diversos acidentes ambientais, destruição da camada de ozônio, elevação da temperatura do planeta e aumento de geração de resíduos sólidos começou um movimento por parte da sociedade de cobrar maior responsabilidade das empresas com relação ao meio ambiente (BARBOSA, HOURNEAUX e KATZ, 2004, p. 3). Problemas como o aquecimento global, lixo, poluição das águas, desmatamento e desertificação passaram a fazer parte das pautas de reuniões internacionais.

O aquecimento global é reconhecido atualmente por toda a sociedade como uma real ameaça ao planeta Terra e à existência humana (SANQUETTA, 2011). Nos últimos 10 mil anos o Homem vem modificando intensamente o planeta de acordo suas necessidades, desejos e crenças. Antes disso as alterações eram causadas essencialmente pela natureza (Eras Glaciais, choques com corpos espaciais, desenvolvimento desordenado de algumas espécies, etc.) com baixo impacto, a nível global, das espécies vivas do planeta.

A problemática dos resíduos sólidos tornou-se motivo de grande atenção da sociedade organizada a partir da década de 90 (CAVALCANTI, 1998 *apud* KRAEMER, 2005; BALDANZI, s/ano). Nas cidades, o acelerado processo de urbanização trouxe graves consequências quanto à degradação ambiental, principalmente com relação à geração e gerenciamento o lixo. De acordo com LEAL, FARIAS e ARAÚJO (2008) após a Revolução Industrial, “devido ao crescimento das populações e das necessidades de consumo, as indústrias cresceram consideravelmente em número, áreas de atuação e variedade de produtos. Entretanto, a disciplina e a preocupação com o meio ambiente natural não se

fizeram presentes durante muitos anos, tendo como resultado problemas ambientais de grandes dimensões.”

QUADRO 1 – CRONOLOGIA DOS EVENTOS RELEVANTES RELACIONADOS ÀS QUESTÕES AMBIENTAIS

<b>Acontecimento / evento</b>	<b>Ano</b>
Publicação do livro: “Primavera Silenciosa” por Rachel Carson, associando problemas ambientais aos pesticidas sintéticos.	1962
Conferência intergovernamental para o uso racional e conservação da biosfera (UNESCO) – primeiras discussões sobre o conceito de desenvolvimento sustentável.	1968
Fundação do Clube de Roma, para discussão, entre outros assuntos, de desenvolvimento sustentável e meio ambiente.	1968
Princípio do poluidor pagador – no qual a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) determina que aqueles que causam poluição devem pagar por isso.	1971
O Clube de Roma publica: “Limites do crescimento” – Relatório controverso e pessimista, prevendo sérias consequências caso o crescimento não fosse reduzido.	1972
Conferência das Nações Unidas para o meio ambiente, em Estocolmo, com foco em chuva ácida e outros temas relativos à poluição nos países nórdicos.	1972
É descoberto por cientistas britânicos e americanos o buraco na camada de ozônio na Antártida.	1985
Publicado o Relatório “Brundtland Report”, Nosso Futuro Comum, no qual são abordados, de forma integrada, aspectos econômicos, sociais e ambientais para uma nova ordem global.	1987
É criado o painel intergovernamental de mudanças climáticas como um fórum de discussão técnico, econômico e científico.	1988
Conferência denominada Cúpula da Terra promovida pelas Nações Unidas no Rio de Janeiro, deu origem à carta de intenções denominada Agenda 21, a Convenção sobre diversidade biológica e as bases para a Convenção das Mudanças Climáticas.	1992
Convenção das Partes (COP 01) realizada em Berlim, sendo discutido o papel de cada nação na emissão de gases do efeito estufa.	1995
Sistema voluntário de certificação ambiental – ISO 14001 é formalmente adotado para sistemas de gestão ambiental.	1996
COP 03, realizado em Quioto no Japão, onde 37 países desenvolvidos e economias em transição se comprometiam a reduzir, em conjunto, em 5,2% suas emissões em relação a 1990.	1997
Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio + 10): avaliação de progressos em relação a Rio 92 e definição de metas.	2002
ONU declara 2005 o início da década da Educação para o Desenvolvimento Sustentável, a ser implementada pela UNESCO.	2002
COP 16 (Cancún – México): Oficialização do teto de 2°C no aumento da temperatura da Terra.	2010

Fonte: Adaptado de PIOTTO (2003, p. 4) e MMA (2012).



A sociedade atual, altamente industrializada, utiliza recursos naturais para geração de bens de consumo e energia. Temos como resultado ao fim deste processo, além do produto acabado, os resíduos industriais, das mais variadas formas (KRAEMER, 2005). O gerenciamento dos resíduos é fundamental para um ambiente saudável, reduzindo impacto nos corpos hídricos e no solo.

#### **4.2 Resíduos Sólidos – Legislação Brasileira**

A norma brasileira que trata de resíduos sólidos é a NBR 10.004/2004, segundo a qual “resíduos sólidos são aqueles resíduos que se encontram nos estados sólido e semi-sólido, e resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

No estado do Paraná a Lei nº 12.493/99 (CELEPAR, 1999) dispõe sobre princípios, procedimentos, normas e critérios referentes à geração, acondicionamento, armazenagem, transporte, tratamento e destinação final de resíduos sólidos. São princípios desta lei: (a) Não geração, (b) Minimização, (c) Reaproveitamento, (d) Reciclagem e (e) Tratamento e disposição final adequados.

De acordo com WITTMANN (2010, p.21) a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) refere-se aos resíduos em quatro normas:

- NBR 10.004 – Classificação;
- NBR 10.005 – Procedimento – Lixiviação;
- NBR 10.006 – Procedimento – Solubilização;
- NBR 10.007 – Procedimento – Amostragem.

A caracterização de um resíduo (NBR 10.004) permite classificar um resíduo sólido, bem como identificar se este deve ser qualificado como perigoso por apresentar características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e

patogenicidade. Estas características devem direcionar os esforços no processo de gestão e destinação do resíduo.

A NBR 10.004 classifica os resíduos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente em dois grandes grupos (RIBEIRO, 2010):

- Resíduos Classe I (Perigosos): resíduos com alguma das características já citadas, entre elas inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Resíduos Classe II (Não perigosos): São divididos em **Não Inertes** (II A), com propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e **Inertes** (II B), cuja solubilidade não comprometa os padrões de potabilidade, exceto cor, aspecto, dureza, sabor e turbidez, quando analisados segundo as NBR 10.006 e 10.007 (WITTMANN, 2010).

### 4.3 Geração de Energia com Biomassa

#### 4.3.1 Geração de Vapor

Quando se coloca certa quantidade de energia na água, esta pode armazenar a energia transferir para outro corpo que esteja em menor temperatura. Se a quantidade de energia for suficiente para vaporizar a água, resulta-se em vapor de água, uma substância com alta capacidade térmica, que poderá transferir esta energia para um corpo ou substância, seja para aquecimento (vapor saturado) ou para realização de trabalho (vapor superaquecido). O uso do vapor como conhecemos, produzidos em caldeiras, remonta a Revolução Industrial, iniciada no século XVIII, (SERRA, 2006).

O vapor de água tem sido uma das grandes fontes de energia para aquecimento (água em fabricação de papel), secagem (grãos, celulose, etc.) e evaporação (fabricação de suco, leite em pó, etc.) na indústria moderna, além de movimentar máquinas (locomotivas e navios) e gerar energia elétrica (usinas termelétricas – turbinas a vapor). Os usos do vapor na indústria são inúmeros, sendo que isto se deve principalmente a água ser abundante e ter grande capacidade de armazenamento de energia. Segundo SERRA (2006, p.40), as qualidades que levam o vapor ser amplamente utilizado na atividade industrial são:

- Uso cíclico em vários níveis de pressão e temperatura;
- Ser de fácil distribuição e controle;
- Ser uma substância abundante no planeta;
- Possuir grande capacidade de armazenamento de energia e de transformar energia térmica em outras formas de energia;
- Passível de ser gerado em equipamentos de alta eficiência;
- Ser um fluido limpo, inodoro, insípido e não tóxico.

Para que o vapor de água seja produzido e forneça energia para os processos industriais é preciso, obviamente, fornecer esta energia térmica à água líquida. Esta energia pode ser fornecida por eletricidade ou através do processo de combustão (queima) de compostos tais como biomassa (madeira, bagaço de cana, palha de arroz, resíduos florestais, entre outros), derivados de petróleo e carvão. A quantidade de energia é relativamente grande: para evaporar 1000 L de água é necessário, por exemplo, queimar 400 kg de lenha ou 100 kg de óleo combustível em uma caldeira de 40 kgf/cm<sup>2</sup> (estes valores dependem a que nível de entalpia busca-se levar o vapor). A Figura 1 mostra a porta de inspeção de uma fornalha de caldeira.



FIGURA 1 – PORTA DE FORNALHA APRESENTANDO O CAVACO EM COMBUSTÃO.  
Fonte: Arquivo do Autor

A queima de combustíveis gera resíduos sólidos, em menor ou maior quantidade. Fatores como a eficiência da combustão e teor de cinzas do combustível controlam o volume de resíduo gerado.

### 4.3.2 Constituição da Biomassa

De maneira geral, as biomassas são hidrocarbonetos com presença de oxigênio em sua composição química. A presença desse elemento reduz a necessidade de comburente, comparado aos compostos de petróleo, no entanto reduz seu poder calorífico (NOGUEIRA, 2008 *apud* MOERS *et al*, 2011). Estes três elementos básicos formam estruturas denominadas celulose (40 a 50%), hemicelulose (20 a 40%) e lignina, com composições variadas para cada biomassa (MOERS *et al*, 2011). O Quadro 2 apresenta a constituição elementar de algumas biomassas.

QUADRO 2 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE ALGUNS TIPOS DE BIOMASSA

Biomassa	Composição					Teor de Cinzas
	C	H	O	N	S	
Pinus	49,2	5,9	44,3	0,06	0,03	0,30
Eucalipto	49,0	5,8	43,9	0,03	0,01	0,72
Casca de arroz	40,9	4,3	35,8	0,40	0,02	18,30
Bagaço de cana	44,8	5,3	42,3	0,38	0,01	1,50

Fonte: Adaptado de BRANCO (2012b) e BRAND (2008)

Na madeira os elementos ainda podem ser separados em voláteis, passam para o estado vapor com 500°C, num percentual que varia entre 75 e 85% e carbono fixo, entre 15 e 25% (BRAND, 2008 p. 23).

Segundo MCKENDRY (2002) *apud* MOERS *et al* (2011) quando as ligações entre as moléculas de carbono, oxigênio e hidrogênio são rompidas (seja por combustão, digestão ou decomposição) estas substâncias sua energia armazenada.

### 4.3.3 Constituição das Cinzas

As cinzas (fração inorgânica da biomassa) agregam todos os elementos que não são relevantes nas reações de combustão, como o fósforo, o potássio e o cálcio (NOGUEIRA, 2003, *apud* BRAND, 2008). São materiais inorgânicos, sendo constituídos por Ca, Si, Mg, K e S, segundo BORLINI *et al* (2005, p.192). No Quadro 2 está apresentado o percentual de cinzas de algumas biomassas muito utilizadas para geração de energia. O teor de cinzas presente na biomassa reduz seu poder calorífico (BRANCO, 2012b).

De acordo com BRAND (2007; 2008) o teor de cinzas varia em função da biomassa, da espécie da madeira e da posição onde foi retirada a amostra (tronco, galhos, cascas, etc.). Ainda segundo a autora, o teor de cinzas tem um significado importante pelas seguintes razões:

- A cinza não se queima, requerendo um sistema próprio para retirada, além da disposição; e
- A cinza é constituída de material abrasivo, causando erosão nos equipamentos.

Os principais componentes das cinzas provenientes da queima de madeira são:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Segundo BRANCO (2012a), as cinzas podem causar ataque químico aos refratários, sinterização do material particulado e incrustações de óxidos alcalinos quando o teor de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  está elevado.

A Tabela 1 apresenta uma análise típica dos constituintes do rejeito de queima (cinzas). As grandes diferenças que podem ocorrer, comparando uma caldeira com outra, é na umidade (cada processo umedece o suficiente para não pegar fogo no bag) e na matéria orgânica. O teor de matéria orgânica nas cinzas é controlado pela eficiência de combustão, quanto mais eficiente, menor o teor de orgânicos.

TABELA 1 – ANÁLISE DE CINZA DE CALDEIRA

Elemento / Substância	RIPASA <sup>1</sup>	JARI <sup>2</sup>
CaO (%)	4,82	4,18
K <sub>2</sub> O (%)	1,73	1,54
Matéria Orgânica (%)	4,64	35,16
Mg total (%)	0,73	0,61
N (%)	0,26	0,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,71	0,63
pH	10,3	10,8
S (%)	0,13	0,46
Umidade (%)	27,57	26,59

Fonte: STAPPE; BALLONI (1988 *apud* RIBEIRO, 2010 p.35).

<sup>1</sup>RIPASA: empresa produtora de celulose e papel

<sup>2</sup>JARI: empresa produtora de celulose na região norte do país.

#### 4.3.4 Combustão Industrial

A combustão é um processo químico exotérmico composto de dois elementos distintos, o combustível e o comburente. A reação mais largamente utilizada na indústria é a que utiliza o oxigênio como elemento comburente. Abaixo segue as três condições necessárias para que haja combustão (NOGARA e CASTRO, 2010, p. 31):

- Combustível – Toda substância (seja em estado sólido, líquido ou gasoso) que reagindo com o oxigênio irá liberar calor;
- Comburente – É todo elemento que, associando-se quimicamente ao combustível, é capaz de fazê-lo entrar em combustão (o oxigênio é o principal comburente);
- Temperatura de ignição – Além do combustível e do comburente, é necessária uma terceira condição para que a combustão possa se processar. Esta condição é a temperatura de ignição, que é a temperatura acima da qual um combustível pode queimar.

Os combustíveis utilizados são compostos basicamente de carbono, hidrogênio e oxigênio (percentual elevado na biomassa e reduzido nos derivados de petróleo), além de uma pequena porcentagem de enxofre, nitrogênio e de outros elementos (NOGARA e CASTRO, 2010; BRAND, 2008).

Os combustíveis podem ser classificados de acordo com seu estado físico nas condições ambientes em:

- Sólidos: madeira, bagaço de cana, turfa, carvão mineral, carvão vegetal, etc.;
- Líquidos: líquidos derivados de petróleo, óleo de xisto, alcatrão, licor negro (lixívia celulósica), álcool, óleos vegetais, etc.;
- Gasosos: metano, hidrogênio, gases siderúrgicos, biogás, etc.

Um importante conceito para a queima de combustíveis é o poder calorífico, que consiste na quantidade de calor liberada durante a combustão completa (NOGUEIRA E LORA, 2003 *apud* BRAND, 2008). Segundo BRAND (2008), para os combustíveis que formam água, o poder calorífico é dividido em três formas, cada uma com sua aplicação conceitual:

- Poder calorífico superior ( $P_{CS}$ ): quantidade de calor gerada com a combustão de uma unidade de massa do combustível.
- Poder calorífico inferior ( $P_{CI}$ ):  $P_{CS}$  descontando a energia de condensação da água formada na combustão.
- Poder calorífico líquido ( $P_{CL}$ ):  $P_{CI}$  descontando a energia para remover a umidade do combustível.

Considerando cavaco de *Pinus taeda* a 50% de umidade, o  $P_{CS}$  (medido em bomba calorimétrica) é 2418 kcal/kg, o  $P_{CI}$  calculado é 2099 kcal/kg e o  $P_{CL}$ , também calculado, resulta em 1799 kcal/kg. O Quadro 3 apresenta o poder calorífico de três amostras de *Pinus taeda* realizadas no Instituto de Tecnologia do Paraná, TECPAR, (lembrando que a medição é realizada apenas de  $P_{CS}$ , o restante é cálculo).

QUADRO 3 – PODER CALORÍFICO DE AMOSTRAS DE *PINUS TAEDA*

Poder calorífico	Cavaco médio <sup>1</sup>	Cavaco grande <sup>2</sup>	Cavaco velho <sup>3</sup>
Pcs (kcal/kg)	2380	2418	2191
Pci (kcal/kg)	2061	2099	1872
Pci (kcal/kg)	1761	1799	1572
Umidade (%)	51,2	49,8	55,2

Fonte: Relatório de análises realizado no TECPAR (03/05/2011). Arquivo do autor.

<sup>1</sup>**Cavaco médio:** Amostra de cavaco de pinus de dimensões entre 3 e 20 mm.

<sup>2</sup>**Cavaco grande:** Amostra de cavaco de pinus de dimensões entre 10 e 50 mm.

<sup>3</sup>**Cavaco velho:** Amostra de cavaco de pinus estocado sem cobertura por nove meses (incidência de biodegradação e formação de serragem).

O poder calorífico é inversamente proporcional ao teor de umidade (água contida na biomassa) e às cinzas (conteúdo inorgânico). Para cada quilograma de água contida na biomassa são necessários cerca de 600 kcal na forma de calor para evaporá-la (BRAND, 2008). Em termos práticos, no processo de queima de pinus em torno de 25% da energia da biomassa é utilizada para secagem do próprio combustível.

O comburente mais utilizado é o ar atmosférico, pelo fato de ser a fonte mais abundante e barata de oxigênio, sendo ainda utilizado o ar atmosférico enriquecido ou mesmo o oxigênio puro casos bem específicos, por exemplo, em alguns tipos de fornos.

De acordo com a dosagem de ar, a combustão pode ser completa ou incompleta. Na combustão completa, ocorre a reação total do carbono, sendo oxidado a  $\text{CO}_2$  e água (vapor). Conforme NOROGA e CASTRO (2010) é necessário um excesso de ar (acima da quantidade estequiométrica, normalmente entre 30 e 50% para caldeiras de biomassa) para que seja minimizada a formação de compostos característicos de combustão incompleta. Na incompleta, parte do carbono não reage ou reage parcialmente com o oxigênio, produzindo, além dos compostos anteriores, monóxido de carbono (CO). Normalmente, associada à geração de CO, a combustão com falta de ar ou oxigênio (comburente) tende a gerar mais fuligem, característica de queima pouco eficiente.

Na Tabela 2 encontram-se as principais reações que ocorrem no processo de combustão.

TABELA 2 – REAÇÕES GLOBAIS DE COMBUSTÃO

Reação	Calor de reação (kcal/kg)	Tipo de combustão
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	7.786	Combustão completa
$2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$	2.412	Combustão incompleta
$2 \text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}$	2.365	Combustão incompleta
$2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$	33.945	----
$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	2.195	----

Fonte: Adaptado de NOGARA e CASTRO (2010)

A biomassa em geral é um combustível rico em voláteis (entre 75 e 85% segundo BRAND, 2007). Isto faz com que o processo de combustão ocorra em seis etapas consecutivas bem definidas (SILVA, 2000 p.40):

1. Secagem;
2. Emissão dos voláteis;
3. Ignição dos voláteis;
4. Queima dos voláteis em chama;
5. Extinção da queima dos voláteis;
6. Combustão dos resíduos de coque.



De acordo com SILVA (2000) o processo de combustão de biomassa ocorre primeiramente uma etapa homogênea (queima dos voláteis) e em seguida uma etapa heterogênea (queima do resíduo de coque). A Figura 2 apresenta graficamente a fração de consumo da biomassa em função da temperatura no processo de combustão.

Quando o cavaco queima sobre o grelhado os voláteis se desprendem e queimam acima do leito de biomassa. Dessa forma, é preciso dividir o ar em primário (entra e é distribuído pelo grelhado), que irá queimar o resíduo de coque e ar secundário, que entra por sobre o leito e queima os voláteis (SILVA, 2000).

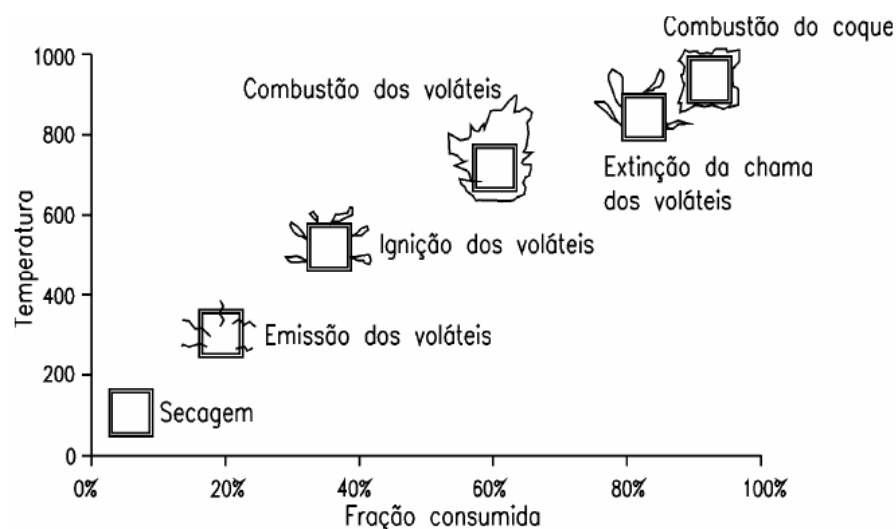


FIGURA 2 – ETAPAS DE COMBUSTÃO DA MADEIRA

Fonte: HELLWIG, 1982, *apud* SILVA, 2000 p. 40.

O ar secundário também é chamado de “over-fire” por sua característica de criar uma barreira para o fogo, reduzindo a emissão de partículas (chamadas de cinzas volantes) para a seção de exaustão. Segundo SILVA (2000, p.41) “operação com ar secundário insuficiente pode intensificar as emissões de particulados em uma caldeira”. Estima-se que a partícula tem entre 2 e 3 segundos para entrar em combustão, antes que seja arrastada para a seção de gases.

#### 4.3.5 Geração de Cinzas em Caldeira de Biomassa

Conforme dados já vistos no Quadro 2, a combustão de biomassa vai gerar cinzas, uma vez que é constituinte do próprio combustível e não queima. A forma que este material ficará disposto no sistema depende do tipo de equipamento utilizado para queimar, recircular e reter as cinzas:

- Queimar: a queima de combustíveis sólidos pode ser feita sobre a grelha (superfície que suporta o combustível e permite a passagem de ar) ou em suspensão. Parte das cinzas sai no cinzeiro (e é chamada escória ou cinza pesada) e o restante é levado para a seção de exaustão (chamadas de cinza volante). Este material que sai no cinzeiro possui teor de carbono muito baixo ou nulo, com aparência de pedras, não podendo recircular na caldeira.
- Recircular: parte das cinzas que é levada da fornalha para a seção de exaustão possui dimensões acima de 100  $\mu\text{m}$ , tendo facilidade para se chocar contra os tubos dos recuperadores de energia (Pré-aquecedores de ar e água), que se encontram na seção de exaustão, e ser reinjetados na fornalha. Esta parte das cinzas é chamada fuligem e possui teor de matéria orgânica de até 90%.
- Reter: o volume de cinzas que passa pelos recuperadores de energia é constituído de partículas bastante finas (chamadas de material particulado) e são retidos para não ir para a atmosfera. Os equipamentos que fazem este trabalho são separadores sólido-gás, por exemplo, multiciclones, filtros de manga e precipitadores eletrostáticos (NOROGA e CASTRO, 2010).

De acordo com FLOOD E FREW (1974, *apud* SILVA 2000, p. 56) no caso de caldeiras para bagaço (biomassa) a concentração de cinzas na seção de gases (cinzas volantes) vai de 1000 a 30.000  $\text{mg/N.m}^3$  (5.000 a 8.000  $\text{mg/N.m}^3$  em caldeiras de limpeza periódica e combustão sobre a grelha). A composição e distribuição granulométrica destas partículas, que serão para os reinjetores, multiciclones e atmosfera, depende (1) das características físico-químicas da biomassa, (2) regime de operação e capacidade da caldeira e (3) sistema de queima

e limpeza da grelha. O percentual de cinzas formadas na queima que são arrastadas com os gases varia de 60 a 90% em sistemas de queima em camada (sobre a grelha) e de 90 a 98% para queima em suspensão (SILVA, 2000).

No próximo item serão apresentados os diversos equipamentos relacionados à combustão de biomassa, recuperação e retenção de cinzas, permitindo maior compreensão da geração de cinzas.

#### 4.3.6 Caldeiras de Biomassa

A NR-13 define caldeira a vapor como todo equipamento destinado a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia. Quanto à pressão de operação, podem ser classificadas como (NOROGA e CASTRO, 2010):

- CATEGORIA A: pressão de operação superior a  $19,98 \text{ kgf/cm}^2$ ;
- CATEGORIA C: caldeiras cuja pressão de operação seja igual ou inferior a  $5,99 \text{ kgf/cm}^2$  e volume interno igual ou menor que 100 L;
- CATEGORIA B: caldeiras que não se enquadram nas categorias A e C.

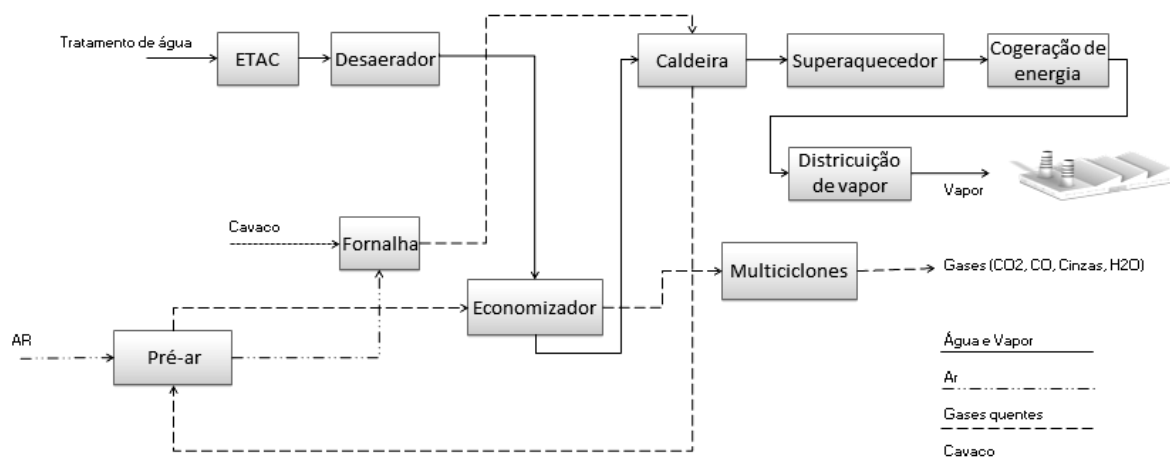


FIGURA 3 – ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UMA CALDEIRA DE COGERAÇÃO.  
Fonte: Elaborado pelo Autor.

No esquema apresentado na figura 3 o sistema de geração de vapor (e cogeração de energia) é composto basicamente da Estação de Tratamento de Água da Caldeira (ETAC), sistema de desaeração, recuperadores de energia (Pré-ar e

Economizador), sistema de tratamento dos gases de exaustão (Multiciclones) e Turbina de cogeração.

As caldeiras de médio e grande porte são projetadas de forma a maximizar a recuperação de energia. Dessa forma, a água de alimentação e o ar para queima são pré-aquecidos com os gases de combustão. São diversos os exemplos de integração térmica em um sistema de geração de vapor. A Figura 4 apresenta uma caldeira completa com a qual será explicado o funcionamento de uma caldeira de biomassa tipo aquatubular. A biomassa é alimentada na fornalha em (D), recebendo ar para queima na parte inferior do grelhado (flechas azuis), previamente aquecido por contato indireto pelos gases de exaustão (flechas vermelhas). Os gases formados na fornalha promovem a evaporação da água (B), superaquecimento do vapor (S), pré-aquecimento da água (E) e do ar de queima (P).

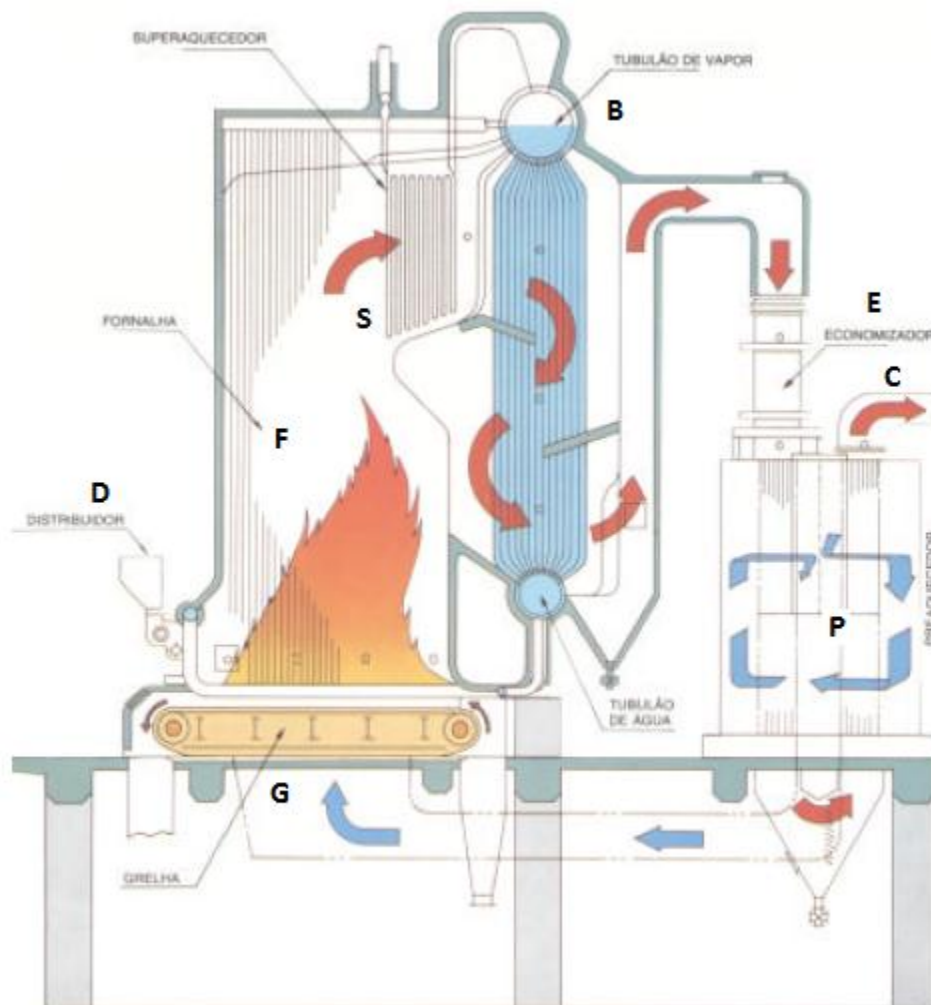


FIGURA 4 – CALDEIRA VERTICAL COM GRELHA ROTATIVA PARA COMBUSTÃO DE BIOMASSA.  
Fonte: MARTINELLI (s/ano).

- Fornalha (F) – câmara destinada à queima do combustível, onde o calor é gerado através de reações de combustão. A fornalha é cercada por tubos cheios de água que ligam o tubulão inferior ao tubulão de vapor.
- Caldeira ou balão (B) – a caldeira propriamente dita corresponde ao vaso fechado sob pressão onde a água transforma-se em vapor saturado.
- Grelhado (G) – estrutura metálica fixa ou móvel que suporta o combustível na fornalha.
- Distribuidor (D) – Sistema de alimentação e distribuição de combustível na fornalha.
- Superaquecedor (S) – o superaquecedor eleva a temperatura do vapor saturado fazendo com que este se transforme em vapor superaquecido. A utilização deste vapor é imprescindível para a produção de energia, mas é pouco usado em processos.
- Economizador (E) – o economizador eleva a temperatura da água de alimentação através da troca térmica com os gases de exaustão, elevando a eficiência global do sistema e reduzindo choques térmicos.
- Pré-aquecedor de ar (P) – trocador de calor que permite a troca de calor entre os gases de combustão e o ar alimentado na caldeira. Dessa maneira, melhora-se a combustão da fornalha, mantendo-se a temperatura de regime mais elevada, economizando-se, assim, o combustível.
- Chaminé (C) – é o componente que permite a saída dos gases de queima.

A caldeira pode ainda ter equipamentos de limpeza e purificação dos gases, tais como filtros, ciclones ou precipitadores eletrostáticos para captação de material particulado ou ainda lavadores de gases para captação de gases ácidos (NOROGA e CASTRO, 2010). Este sistema de tratamento dos gases e o sistema de reinjeção de cinzas para queima serão tratados nos próximos dois itens devido à importância para o tema do trabalho. O objetivo é apresentar o equipamento utilizado na empresa estudada para que depois seja apresentada propostas e melhorias no processo. Portanto não serão abordados outros sistemas.

Em uma caldeira de biomassa as cinzas são **removidas** (não é reinjeção) do sistema de três diferentes formas: (1) no cinzeiro da caldeira, material inorgânico denominado escória, (2) nos retentores de cinzas (multiciclones, lavadores de

gases, filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos), material geralmente com algum teor de carbono, e (3) na chaminé, através das emissões de material particulado.

#### **4.4 Alternativas para Destinação de Resíduos de Queima (cinzas)**

##### **4.4.1 Aterro Sanitário**

Segundo a norma ABNT NBR 8.419/2004, aterro sanitário é:

Uma técnica de disposição dos resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

De acordo com BAHIA (s /ano, p. 9) o aterro sanitário é um equipamento projetado para receber e tratar lixo, com bases em estudo de engenharia, reduzindo ao máximo os impactos causados ao meio ambiente. A técnica, no entanto, não é livre de riscos, pois a decomposição dos resíduos sólidos libera gases tóxicos e inflamáveis e gera efluentes líquidos (chorume), que pode contaminar o solo. (BAHIA, s/ano, p. 5). Os riscos são minimizados com utilizando alguns conceitos estabelecidos na ABNT NBR 13.896. A Figura 5 apresenta os principais componentes de um aterro sanitário.

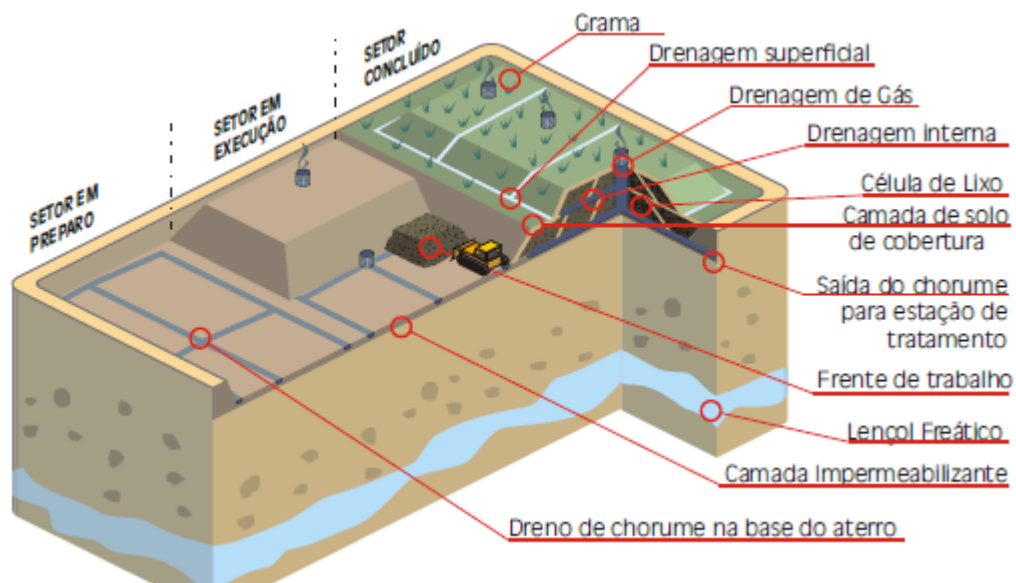


FIGURA 5 – CORTE DA SEÇÃO DE UM ATERRO SANITÁRIO.

Fonte: BAHIA (s/ano)

A construção de um aterro deve atender alguns requisitos básicos normatizados para que atendam questões críticas de segurança. Os principais requisitos são atendidos quando o sistema possui (1) camada impermeabilizante, (2) canais para drenagem do chorume, direcionando o líquido para tratamento, (3) sistema de drenagem do gás formado, (4) delimitação do aterro com talude ou construção escavada e (5) drenagem superficial de água da chuva (Figura 15).

De acordo com WITTMANN (2010), apesar de o aterro minimizar os impactos ambientais, sua utilização para resíduos orgânicos pode retardar a decomposição do resíduo, uma vez que privam os microrganismos das condições ideais de desenvolvimento. Outra questão levantada é o comprometimento de áreas enormes durante muitos anos.

A destinação das cinzas em aterro sanitário tem dois importantes pontos negativos:

- Volume: devido ao grande volume de resíduos produzidos continuamente, as cinzas vão requerer grandes áreas para ficarem armazenadas;
- Valor agregado: destinando as cinzas para aterros perde-se seu valor químico, ou seja, os benefícios que seus elementos constituintes podem oferecer.

Os dois próximos tópicos trazem alternativas que agregam valor às cinzas de caldeira, mostrando que este material pode trazer importantes contribuições na matriz produtiva de outros bens e produtos.

#### 4.4.2 Agricultura

A acidez do solo limita a produção agrícola em diversas partes do mundo devido, principalmente, à carência de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Isto afeta tanto o estabelecimento quanto o desenvolvimento da planta. Nesse caso, o calcário é a forma mais simples para resolver estes problemas, pois eleva o pH do solo e aumenta a retenção de cátions. (ERNANI *et al*, 2000, *apud* CAMPANHARO *et al* 2008 p. 1).

RONQUIM (2010, p. 5) diz que os constantes cultivos reduzem a fertilidade do solo. A redução de fertilidade é causada pela perda de nutrientes e elevação da acidez do solo. Os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) são absorvidos pelas plantas em maior quantidade que os micronutrientes (B, Zn, Cu, Fe, Mo, Cl e Mn), sendo que as deficiências devem ser supridas por fertilizantes. Os fertilizantes podem ser químicos minerais, minerais retirados de jazidas, matéria orgânica ou o próprio nitrogênio retirado ao ar (RONQUIM, 2010, p.6).

O grau de acidez (pH) ou de alcalinidade determina a reação do solo, que influencia absorção de íons pelas plantas, disponibilidade de nutrientes, atividade de microrganismos, entre outros (RONQUIM, 2010, p. 10). Ainda de acordo com o autor, o pH fornece indícios das condições químicas do solo. Um solo ácido, alta concentração de íons  $\text{H}^+$ , geralmente apresenta pobreza em bases ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ) **elevado teor de alumínio tóxico** (o alumínio é um grande inimigo em praticamente todas as culturas), excesso de Mn, e deficiência de algum micronutrientes.

OLIVEIRA *et al* (2006) *apud* CAMPANHARO *et al*. (2008 p. 1) diz que as cinzas apresentam em sua composição quantidades razoáveis de macro e micronutrientes, além da característica de corrigir a acidez do solo, para ser utilizado como adubo.

De acordo com GONÇALVES e MORO (1995, p. 9), avaliando aplicação de cinzas de caldeira até 45 t/ha, a utilização das cinzas foi um dos fatores para que a cultura de *Eucalyptus grandis* tivesse maior produtividade comparada ao tratamento



que recebeu adubo. Na opinião dos autores, os nutrientes das cinzas encontram-se prontamente disponíveis, ao contrário dos fertilizantes onde os nutrientes encontram-se solúveis, mais sujeitos à perda por lixiviação.

O aumento do pH do solo com a adição de cinzas pode ser atribuído à liberação dos carbonatos de cálcio, magnésio e potássio após a reação das cinzas (PRADO *et al.*, 2002 *apud* CAMPANHARO *et al.*, 2008, p.3), e por estas apresentarem em sua composição química nutrientes e bases em condições de neutralizar a acidez do solo (GONÇALVES E MORO, 1995, p.9).

A viabilidade técnica, econômica e/ou ambiental da utilização de cinza vegetal em terras agricultáveis estão relacionados com a origem, volume e destinação destes resíduos (LIMA *et al.*, 2005 p.2).

Segundo PIOTTO (2003, p. 190) “as cinzas provenientes da queima dos resíduos orgânicos podem ser utilizadas nas florestas para repor parte dos nutrientes”. RIBEIRO (2010) afirma que a cinza apresenta um conteúdo de matéria orgânica e um pH básico que a indica para o condicionamento do solo.

De acordo com SÉKULA (2012) o uso das cinzas resultantes da queima de biomassa como corretivo e /ou fertilizante na agricultura é um meio eficaz de reciclar nutrientes como Potássio, Cálcio, Fósforo e Magnésio, incorporando ao solo um produto que de outra maneira seria descartado.

Segundo estudo de LOPES *et al.* (2005, p. 2) “a flexibilidade da utilização da cinza vegetal como fonte de nutrientes para as culturas depende da fertilidade do solo, das exigências nutricionais e da origem da cinza. A cinza vegetal apresenta grande potencial para ser usada como neutralizador da acidez do solo e como suplemento de nutrientes, principalmente para solos tropicais de baixa fertilidade.” As cinzas vegetais, pouco utilizadas na agricultura como adubo do solo, contêm cálcio, magnésio, fósforo, potássio e outros elementos que podem ter influência no desenvolvimento das plantas (LIMA *et al.*, 2005, p. 2). Dentre estes elementos, alguns são micronutrientes essenciais para o desenvolvimento dos seres vivos, como, por exemplo, Cobre, Zinco, Manganês e Ferro (SÉKULA, 2011).

O uso da cinza pode causar problemas, principalmente com a aplicação de doses excessivas (GOMES, 1960, *apud* DAROLT e OSAKI, 1989 p. 2). O desbalanceamento do equilíbrio catiônico provocado pela aplicação de doses inadequadas de cinza pode vir a ser prejudicial às culturas (RAPOSO, 1963, *apud* DAROLT e OSAKI, 1989, p. 2). Segundo IGNATIEFF e PAGE (1959 *apud* DAROLT e OSAKI, 1989, p. 2) a utilização de doses elevadas de cinzas pode prejudicar as raízes das plantas, levando-as até a morte, em razão da alta alcalinidade.

De acordo com DAROLT e ZAMBON (1993, p. 39), ao estudar o efeito das cinzas em cultura de alface, houve elevação do pH do solo e redução do teor de  $Al^{3+}$  trocável com dosagens de 10 t/ha. Os testes com cultura de alface foram desenvolvidos com dosagens de 10, 15, 20 e 30 t/ha, sendo a dosagem de 10 t/ha a que deu maior produtividade. CAMPANHARO *et al* (2008, p. 3), analisando o solo, chegou ao valor 4,9 t/ha como ponto ótimo de dosagem. De acordo com os autores, o teor de H + Al reduziu conforme o aumento de dosagem, já a capacitada de troca de cátions aumentou.

A aplicação das cinzas da indústria cerâmica realizada por PRADO *et al* (2002, *apud* CAMPANHARO *et al*, 2008) resultou em aumento de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , sendo que a aplicação de cinzas foi suficiente para assegurar as necessidades nutricionais de cultura de goiabeiras.

MAEDA, SILVA e MAGALHÃES (2007) fizeram experimentos com cinzas de caldeira na cultura de *Pinus taeda* nas dosagens 0, 10, 20, 40 e 80 t/ha. As dosagens encontradas como máximas foram de 15 t/ha no Cambissolo e de 8 t/ha no Latossolo. Os autores recomendam a utilização de cinzas para suprimento de nutrientes e correção de acidez do solo, desde que seguidos os procedimentos adequados.

A destinação de resíduos industriais no solo para fins agrícolas teve um aumento de demanda a partir de 1994. Os principais objetivos das empresas com essa prática era reduzir os custos de destinação de resíduos e atendimento das práticas de gestão ambiental da ISO 14.000 (BALDANZI, 2002, p. 63).

Os empreendimentos relativos à aplicação dos resíduos na agricultura precisam de Autorização Ambiental, além da Licença Ambiental de Operação. A regulamentação é feita pela Portaria 224/07 do Instituto Ambiental do Paraná (IAP). A referida Portaria determina a criação de uma Câmara Técnica, composta de 06 engenheiros, para análise dos projetos de gestão dos resíduos. (BALDANZI, s/ano).

#### **4.4.3 Utilização em Outros Segmentos**

##### **4.4.3.1 Compostagem**

A compostagem consiste na produção de um composto orgânico estabilizado através de um processo de biooxidação aeróbica exotérmica, de um substrato orgânico heterogêneo no estado sólido, desenvolvida por uma população diversificada de microrganismos. Os produtos de reação ainda formam dióxido de carbono e água. (WITTMANN, 2010, p. 25).

Na prática, compostagem é a produção de um composto, insumo agrícola, de odor agradável, fácil manipulação e livre de microrganismos patogênicos, a partir de resíduos orgânicos com características desagradáveis de odor, aspecto e contaminação por microrganismos patogênicos (FERNANDES e SILVA, s/ ano). A compostagem, portanto, é um processo biológico que transforma a matéria orgânica crua em um composto completamente diferente do material que lhe deu origem. O material fica disposto em leiras (longas faixa em forma de cone), onde se deve manter as condições de aeração (normalmente revolvimento), relação Carbono / Nitrogênio, umidade e temperatura (CONPACEL, s/ano).

Segundo CARVALHO *et al* (2002, *apud* WITTMANN, 2010, p. 25) foram obtidos resultados satisfatórios na Votorantim Celulose e Papel quanto à adubação do solo com produto de compostagem proveniente de uma mistura de lodo biológico, *dregs* e *grits* (resíduos de caldeira de recuperação), cinza de caldeira de biomassa e casca de eucalipto. Bons resultados também foram alcançados na Conpacel (Consórcio Paulista de Papel e Celulose), onde a compostagem é realizada desde 2008 com lodo biológico, *dregs*, serragem, casca de eucalipto e cinzas de biomassa (4,3% em massa). O rendimento da compostagem é 50% em massa, sendo que

foram investidos R\$ 7,5 milhões para implementação do projeto. (CONPACEL, s/ano, p. 4).

#### **4.4.3.2 Indústria Cerâmica**

A indústria cerâmica tradicionalmente testa o uso de cinzas de caldeira em seu processo de fabricação. Segundo BORLINI e MONTEIRO (2009, p. 881) são inúmeros trabalhos neste sentido. RIBEIRO (2010) avaliou a utilização de *dregs* e *grits* (resíduos inorgânicos gerados na fabricação de celulose) na fabricação de materiais cerâmicos tradicionais. O estudo permitiu concluir que é viável a utilização de 10% em massa desses resíduos na fabricação de telhas e tijolos.

BORLINI *et al* (2005) realizaram um estudo com as cinzas de madeira para possível utilização em cerâmica. A principal conclusão foi que as cinzas possuem elevada área superficial, podendo facilitar a etapa de secagem da cerâmica. Além disso, os óxidos alcalinos e alcalinos terrosos, abundantes nas cinzas, podem contribuir para redução da porosidade de queima através da fusão destes óxidos. Em estudo realizado por BORLINI *et al* (2006), onde foram acrescentados à massa cerâmica 10 e 20% de cinzas, incorporações de até 10% de cinzas, sinterizadas a 1200°C não mudaram a resistência mecânica quando comparada à massa cerâmica. Em geral, não houve mudanças físicas e mecânicas significativas com a adição de cinzas na cerâmica vermelha nas granulometrias de cinzas de até 44 µm ou 325 MESH (BORLINI *et al*, 2006, p. 443).

#### **4.4.3.3 Construção Civil**

As cinzas de caldeira provenientes da casca de pinus foram avaliadas como filer (material de enchimento) em misturas asfálticas. Segundo BARDINI (2008, p. 134 - 135) a utilização do resíduo (cinzas) trouxe uma piora nos testes de resistência à tração, módulo de resiliência, vida de fadiga e dano de umidade induzida, no entanto estes resultados na maioria dos casos ficaram acima das especificações técnicas, o que encoraja a realização de novas pesquisas para sua aplicação.

VASCONCELLOS *et al* (2004) desenvolveram um trabalho aplicando cinzas de caldeira em misturas asfálticas e em argamassas de cimento *Portland*, encontrando resultados promissores. O teste em misturas asfálticas foi realizado substituindo o filler calcário em 35, 50, 70 e 100%, sendo que no caso de máxima adição de cinzas os valores de estabilidade chegaram próximos ao mínimo estabelecido pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Foi utilizado para os ensaios com argamassa percentuais volumétricos de até 12%, sendo que os resultados a 8% de cinzas obtiveram bons valores quanto à resistência a tração e compressão. A adição de cinzas foi recomendada para utilização em pisos de baixo custo (VASCONCELLOS *et al*, 2004, p.146).

#### **4.4.4 Análise Comparativa entre as Formas de Destinação de Cinzas**

Os métodos de destinação de cinzas de caldeira apresentados não englobam todo o campo de aplicação possível para este resíduo. As aplicações apresentadas são as mais utilizadas atualmente, cada qual com suas vantagens e desvantagens.

Mais importante que escolher uma alternativa é encontrar o que for mais adequado para cada situação específica. A alternativa de destinar para aterros (industriais ou sanitários) pode parecer menos viável, no entanto pode ocorrer de as cinzas ajudarem na estabilização química ou estrutural de determinado resíduo fluido. Dessa forma, a alternativa escolhida deve seguir as seguintes diretrizes:

- Estar alinhada com característica geográfica e econômica de cada região. Deve ser observado se a geração de cinzas está na cidade, meio rural, se há agrícola ou pecuária, se está em região de mata nativa, mananciais, etc.;
- A destinação de cinzas deve buscar a viabilidade econômica. É possível agregar valor aos resíduos de queima de caldeira, como foram apresentados vários estudos;
- A solução encontrada deve estar alinhada com o meio ambiente, evitando a poluição e contaminação das áreas;
- É aconselhável a busca de parcerias quando não houver atividade associada na empresa que permita a correta destinação do resíduo. Atividades como a

indústria cerâmica, construção civil, agricultura, silvicultura, entre outros, podem se beneficiar utilizando este material;

- Em qualquer situação deve-se buscar a minimização da geração dos resíduos (seja sólidos ou emissões gasosas), em parte porque as cinzas podem ter percentual de combustível não queimado. Uma forma de minimizar a geração é recircular parte das cinzas reinjetando-as na fornalha;

#### **4.5 O Ponto de Vista do Passivo Ambiental**

As cinzas de caldeira podem se tornar um passivo ambiental bastante oneroso do ponto de vista financeiro se não for planejado um sistema eficiente de recuperação e destinação. As cinzas retidas nos multiciclones (ou outro sistema de retenção) e cinzeiro precisam de destinação adequada, sendo que os volumes são grandes.

A indústria de celulose e papel (C & P) gera em torno de 20 kg de cinzas para gerar 1 ton de celulose (RIBEIRO, 2010, p. 35) e 4 kg de cinzas (considerando que 0,8 kg de biomassa geram 2,0 kg de vapor, que por sua vez produz 1,0 kg de papel) para produzir 1 tonelada de papel. Dessa forma, considerando dados de produção de C & P de 2009 (13.315.000 ton de celulose e 9.428.000 ton de papel - BEN 2010) apenas este setor da indústria é capaz de gerar anualmente 300.000 ton de cinzas (580.000 m<sup>3</sup>). Segundo dados do Balanço Energético Nacional (2010, p.30) a participação da indústria de C & P no consumo de biomassa é apenas de 10,0%. Portanto, é possível ver que a dimensão do passivo ambiental que pode constituir as cinzas é bastante crítica, caso destinado incorretamente.

Ainda avaliando o setor C & P, a destinação do volume de cinzas de 580.000 m<sup>3</sup> requer uma área anual de aterros de 3 m de altura equivalente a 46 campos de futebol de 4.136 m<sup>2</sup>. Se a destinação da massa de cinzas de 300.000 ton fosse a agricultura, considerando a recomendação de 4,9 t/ha (CAMPANHARO *et al*, 2008, p. 3), seriam necessários anualmente 61.224 ha de terras agricultáveis ou de

florestas. Lembrando que o setor de C & P representa apenas 10,0% do consumo de biomassa no Brasil.

Outra questão bastante crítica com relação às cinzas volantes são as emissões gasosas, uma vez que as cinzas, CO e compostos de enxofre podem ser prejudiciais à saúde das pessoas e ao meio ambiente. As cinzas que escapam do sistema de retenção (multiciclones, lavadores de gases, filtros de manga, precipitadores eletrostáticos, entre outros equipamentos similares) são comumente chamadas de material particulado. Este particulado deve ser automonitorado em cada unidade, sendo regulados pelo órgão ambiental (no caso do Paraná é o Instituto Ambiental do Paraná, através da Resolução SEMA 054/06). Os limites de emissões gasosas em caldeiras de biomassa podem ser verificados no ANEXO 02.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo foi dividido da seguinte forma:

- i. Apresentação da empresa e da caldeira estudada;
- ii. Avaliação e caracterização da biomassa como influência na geração de cinzas;
- iii. Caracterização e quantificação das cinzas retiradas como escória, retidas nos multiciclones e perdas como emissões gasosas (chaminé) através de balanços de massa;
- iv. Avaliação da influência da dosagem de cinzas nas análises de solo. Para este tópico foram utilizados os resultados obtidos com as cinzas da caldeira estudada em experimento de outro pesquisador.

### 5.1 Caracterização da Área de Estudo

Situada em Guarapuava, a indústria estudada foi fundada como uma madeireira em 1962. A empresa possui duas máquinas de papel que produzem 106.000 toneladas anuais de papel branco para escrita, impressão e embalagens. Atualmente a empresa possui 650 funcionários atuando nas áreas de papel e reflorestamento.

As coordenadas UTM da empresa estudada são: 7.184.706 N e 434.516 E. A temperatura média no mês mais frio encontra-se abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões amenos, temperatura média no mês mais quente inferior a 22°C, sem estação seca definida e com geadas severas (THOMAZ & VESTENA, 2003 *apud* SÉKULA, 2012).

A geração de resíduos sólidos na empresa consiste basicamente em rejeitos da produção de papel, cinzas de caldeira, lodo biológico e primário provenientes do tratamento de efluentes, sucata, embalagens de matérias prima, resíduos de restaurante e outros em quantidades menos expressivas (PGRS, 2011).

GIMENES (2012) realizou um estudo a respeito das práticas de responsabilidade ambiental presentes na mesma indústria do presente trabalho.



Deste estudo, é possível destacar algumas destas práticas que fazem referência a Gestão de Resíduos Sólidos:

- Programa de Gestão de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/10);
- Coleta Seletiva ligada ao PGRS;
- Destinação de lodo biológico proveniente de tratamento de efluentes em aterro sanitário próprio;
- Automonitoramento das emissões atmosféricas;
- Multiciclones para controle de material particulado;
- Comitê interno de conservação de energia, utilidades e fibras, cujo objetivo é buscar soluções para que o consumo de recursos naturais e matéria prima sejam minimizados, reduzindo a geração de resíduos;
- Desenvolvimento de alternativas autossustentáveis para reciclagem: a empresa possui estação de reciclagem onde é armazenado todo o material reciclável para venda posterior;
- Utilização de cinzas (resíduos de queima) de caldeira em áreas agricultáveis para melhorar a qualidade do solo;
- Segregação e venda de aparas brancas;
- Destinação de lodo primário para confecção de caixas.



FIGURA 6 – VISÃO GERAL DA PLANTA MOSTRANDO AO FUNDO A CALDEIRA DE FORÇA.  
Fonte: Arquivo do Autor.

A Figura 6 apresenta as áreas de Utilidades e Manutenção. No primeiro plano (1) encontra-se a Estação de Tratamento de Efluentes de Lodos Ativados. À direita (2) encontra-se a Subestação Elétrica e no topo direito da figura (3) encontra-se a Caldeira de Cogeração de energia, com potência de geração de 6,4 MW de energia elétrica. Em (4) encontra-se o estoque de biomassa (cavaco de *pinus*) e em (5) estão dispostos os *bags* de cinzas retirados da caldeira.

## 5.2 A Caldeira Estudada

A caldeira estudada é denominada Caldeira 2, fabricação da DEDINI em projeto de 1978, com produção nominal de 60 t/h de vapor superaquecido (42 kgf/cm<sup>2</sup>; 400°C) e potência térmica de 48 MW. A característica de queima na caldeira é sobre a grelha. O grelhado é do tipo móvel, basculante, e limpeza intermitente.

A Caldeira 2 possui ventilador de ar primário, ar secundário, reinjetor de cinzas e ar para distribuição da biomassa no grelhado (espargidor pneumático). O sistema de controle de emissões é por multiciclones. Na figura 7 é apresentada a caldeira do ponto de vista da exaustão de gases (à direita na figura), sendo que à esquerda encontra-se o Tratamento de Água da Caldeira (ETAC) e a Usina Termelétrica (Turbogerador).



FIGURA 7 – CALDEIRA 2 VISTA DA SEÇÃO DE EXAUSTÃO

Fonte: Arquivo do Autor

Nos tópicos a seguir deste mesmo item são descritas as etapas e equipamentos que compõem o sistema de retenção e reinjeção de cinzas da Caldeira 2.

### 5.2.1 Reinjetores de Cinzas

Durante o processo de combustão na fornalha, as partículas mais leves são arrastadas pelos exaustores junto aos gases de queima. Este material, denominado genericamente de cinzas (possui uma parte de maior diâmetro e maior teor de matéria orgânica chamada fuligem e outra mais fina, esta sem utilidade para a combustão) será retirado na seção de exaustão por roscas transportadoras nos recuperadores de calor (sendo reinjetados na fornalha) e nos multiciclones (destinado para outro processo).

Os reinjetores são sistemas cujo objetivo é aproveitar parte do material que não foi completamente queimado, reinjetando-o na fornalha (PERES, 2011). Na caldeira estudada são dois sistemas distintos que serão apresentados a seguir: (1) remoção nas moegas e (2) remoção nos recuperadores de calor.

#### 5.2.1.1 Remoção de Cinzas nas Moegas

Nesta seção, doze ciclones promovem a queda de parte das partículas que foram arrastadas para a seção de gases, logo na saída da seção convectiva da caldeira. Estas partículas de fuligem (Figura 8) se acumulam no fundo das moegas sendo reinjetadas para a fornalha através de um ventilador.



FIGURA 8 – CIRCUITO DE GASES APRESENTANDO OS TUBOS DO SUPERAQUECEDOR  
Fonte: Arquivo do Autor.

#### 5.2.1.2 Remoção de Cinzas nos Pré-aquecedores de Ar e no Economizador

As cinzas que não são recuperadas nos ciclones da saída da fornalha passam por dentro dos tubos dos pré-aquecedores de ar, num total de 3.900 tubos,

e parte se deposita sobre as roscas transportadoras dos pré-aquecedores. As três roscas (Figura 9) alimentam continuamente o ventilador de reinjeção de cinzas (Figura 10).

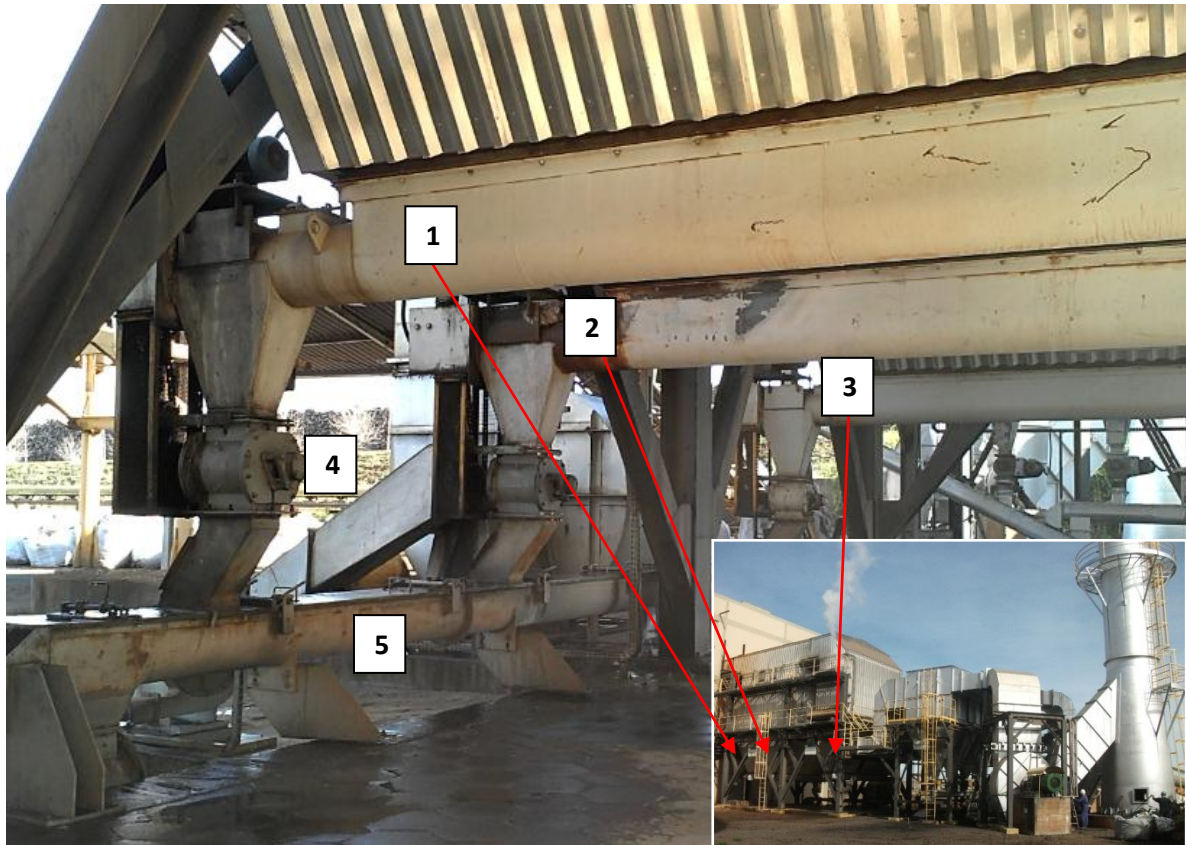


FIGURA 9 – SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE CINZAS POR ROSCAS ROTATIVAS

Fonte: Arquivo do Autor.

A Figura 9 apresenta o sistema de reinjeção de cinzas, sendo (1) a rosca do Pré-Ar 01, (2) a rosca do Pré-Ar 02, (3) a rosca do economizador, (4) a válvula rotativa e (5) a rosca que alimenta o ventilador reinjetor de cinzas.

As válvulas rotativas, presentes nas roscas dos pré-aquecedores de ar e água e também nos multiciclones, possuem a importante função de descarregar o volume de material da rosca sem deixar passar ar no sentido contrário. Desgastes na válvula podem comprometer a eficiência do sistema.



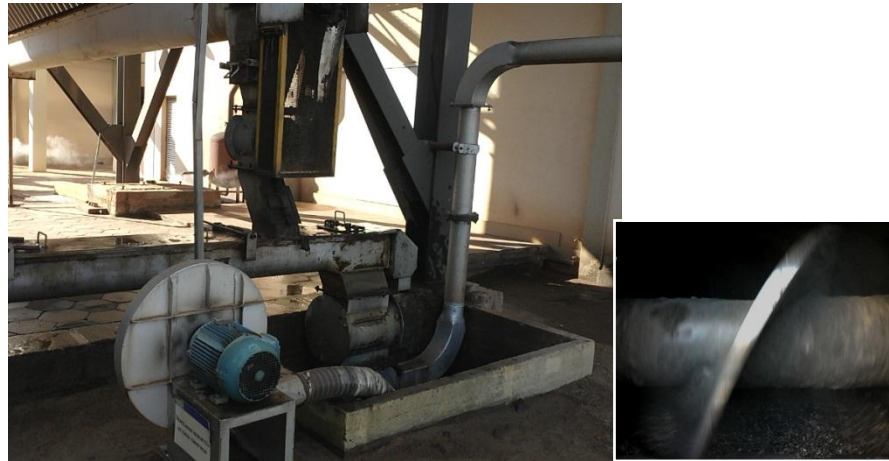


FIGURA 10 – VENTILADOR REIJETOR DE CINZAS E ROSCA TRANSPORTADORA.

Fonte: Arquivo do Autor

### 5.2.2 Retentores de Cinzas (Controle de Emissões)

As cinzas que não foram retidas nos sistemas de recuperação citados no item anterior deverão ser recuperadas no sistema de multiciclones. É neste sistema que são retiradas as cinzas para destinação a agricultura ou aterros sanitários. O objetivo deste sistema é reduzir ao máximo a emissão de material particulado (cinzas arrastadas pelos gases pela chaminé).



FIGURA 11 – VISÃO GERAL DA SEÇÃO DE RECUPERAÇÃO DE CINZAS: À ESQUERDA OS REINJETORES E A DIREITA OS MULTICICLONES

Fonte: Arquivo do Autor

De acordo com PIOTTO (2003, p. 228) o controle de emissão de material particulado, cinzas e material não queimados, é feito com ciclones (eficiência de 85%), no entanto recipitadores eletrostáticos podem ter eficiência bem maiores (95%).

A Caldeira 2 possui um sistema de controle de material particulado nos gases de exaustão composto por quatro multiciclones (denominados PAs). Os PAs 01, 02, 03 e 04 possuem 44, 55, 55 e 66 ciclones, respectivamente, totalizando 220 ciclones. Na especificação de projeto, o sistema de multiciclones foi dimensionado para precipitar material particulado suficiente para uma saída de gás de exaustão de 140 a 180 mg/Nm<sup>3</sup>. Na inspeção semestral de emissões, realizada por empresa especializada, o resultado das emissões de material particulado ficou em 111,2 mg/N.m<sup>3</sup>.

Multiciclones são equipamentos que removem as partículas mais pesadas que o gás. Estes equipamentos são robustos possuem poucas partes móveis e elevada eficiência para partículas maiores que 5 µm (SILVA, 2000). Para partículas muito finas a eficiência é menor, permitindo a saída de material particulado pela chaminé.

O princípio dos ciclones é a remoção de partículas por diferença de peso específico, tendo como força motora a força centrífuga. A Figura 12 mostra no detalhe como é o interno dos multiciclones. O gás entra na câmara superior e é forçado a passar pela seção aletada (forma helicoidal) para poder sair do PA (conjunto de ciclones). A helicoide cria uma força centrífuga que faz as partículas decantarem no fundo do PA e o gás subir para a zona de menor pressão (os exaustores estão criando vácuo após os multiciclones).



FIGURA 12 – VISTA INTERNA DOS MULTICICLONES

Fonte: Arquivo do Autor

Após o material decantar no fundo de cada PA uma válvula rotativa (Figura 14) vai eliminando continuamente o material acumulado. No caso de má vedação ou desgaste nestas válvulas a eficiência da remoção de material particulado decresce devido à fuligem ser aspirada pelos gases. Portanto, estas válvulas devem ser periodicamente inspecionadas e substituídas.

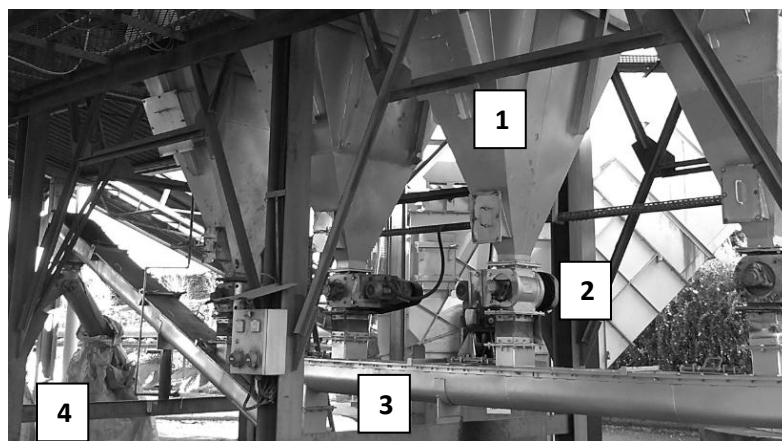


FIGURA 13 – REMOÇÃO DE CINZAS NOS MULTICICLONES  
Fonte: Arquivo do Autor.

A Figura 13 apresenta os principais constituintes do sistema de retenção de material particulado, sendo eles:

1. Multiciclones (PA): é no PA (conjunto de ciclones) que ocorre a separação sólido-gás, sendo que as cinzas amontoam-se na base do equipamento;
2. Válvulas rotativas: devido ao fato de o sistema de retenção de cinzas trabalhar de forma contínua, as válvulas rotativas precisam ter boa vedação para que as cinzas removidas no PA não retorne. Este retorno é comum, caso tenha desgaste na válvula (Figura 12), devido neste ponto o sistema trabalhar sob vácuo de 150 a 200 mmca;
3. Roscas transportadoras de cinzas: transportam as cinzas até os *bags*;
4. Armazenamento em *bags*: as cinzas são levemente umedecidas para evitar incêndio e alocadas no pátio.

É fundamental que as cinzas não entrem em combustão dentro dos *bags*. Para isso é importante que as cinzas recebam um leve umedecimento quando estiverem sendo alimentadas aos *bags*. Os fatores que levam à formação de

incêndios, seja no pátio da caldeira ou nas fazendas, é a presença de fuligem incombusta, calor e ar. Quanto maior o teor de incombustos maior terá que ser o umedecimento. Cinzas com teor elevado de inorgânicos em alguns momentos não precisam de dosagem de água.

O umedecimento das cinzas nos *bags* pode ser realizado por um chuveiro de baixa vazão alocado no ponto onde as cinzas caem do alimentador.

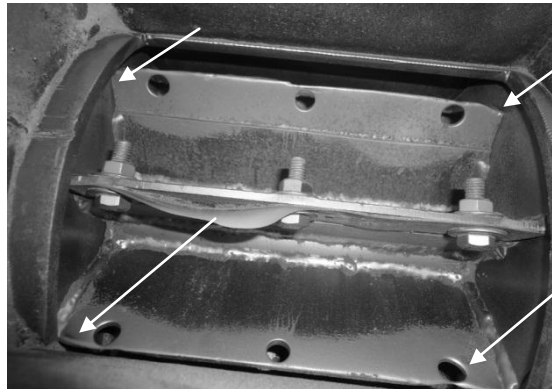


FIGURA 14 – VÁLVULA ROTATIVA DO PA 55A QUE APRESENTAVA DESGASTE (FLECHAS).  
Fonte: Arquivo do Autor

A Figura 15 mostra os *bags* de cinzas alocados no pátio, antes de ir para a destinação agrícola. A eficiência no sistema de retenção de material particulado pode ser observada pela cor da fumaça na chaminé.

O bom funcionamento do sistema de retenção de material particulado é dado por ações como:

- Monitoramento diário da cor da fumaça pela Escala Ringelmann;
- Monitoramento diário do Smoke Test (extração e filtragem de certo volume de gás) na chaminé e também em cada PA individualmente;
- Medição de CO e O<sub>2</sub> para controle da queima;
- Manutenção preventiva das válvulas rotativas dos PAs, realizando revestimento dos internos com material de elevada dureza.





FIGURA 15 – ARMAZENAMENTO DE BAGS NO PÁTIO DA CALDEIRA 2.  
Fonte: Arquivo do Autor.

### 5.2.3 Reinjetores x Retentores de Cinzas

A condição ideal em uma caldeira de biomassa é a maximização do uso da reinjeção de cinzas. O material que vai para os retentores (controle de material particulado) já não traz valor agregado à caldeira. Dessa forma, devem-se realizar ações e projetos para que todo conteúdo orgânico (combustível) seja reinjetado. Deve-se, no entanto, tomar cuidado com elevada reinjeção de material inorgânico, uma vez que irá aumentar a quantidade de material abrasivo na caldeira recebendo energia da fornalha. Nesse caso, recomenda-se um peneiramento do material para que seja reinjetado apenas a fração de incombusto.

Obviamente, devido ao teor de cinzas intrínseco da biomassa, vai haver algo entre 0,2 e 0,5% (BRANCO, 2012a) do total de combustível em forma de cinzas. Esta quantidade de material deve ser removida pelo sistema de abatimento e destinada para outras aplicações, seja agricultura, indústria cerâmica ou simplesmente destinar para aterros sanitários. Resumindo:

INCOMBUSTOS → REINJETORES (Sistema de Recuperação)  
MATERIAL INORGÂNICO → RETENTORES (Sistema de Abatimento)

### 5.3 Determinação da Massa Específica (densidade), e Teor de Cinzas

Em diversos momentos foram realizados testes de umidade, densidade e teor de cinzas, sendo dados muito importantes para a quantificação dos materiais. Portanto, este tópico define a metodologia utilizada em todos os casos da determinação destas propriedades da biomassa, da escória e das cinzas volantes (em alguns momentos separados em cinza fina e cinza grossa ou fuligem).

A densidade ou massa específica representa a massa relativa a um determinado volume, necessária a preencher um recipiente sem qualquer tipo de esforço de compactação. “Representa uma situação de mínimo contato entre partículas e varia de acordo com o diâmetro máximo nominal da mistura” (BARDINI, 2008, p. 56). A densidade utilizada neste trabalho não deve ser confundida com a densidade básica da madeira.

Para determinação da densidade, BARDINI (2008) utilizou a norma AASHTO T-19/T 19M. O recipiente deve ter altura próxima do valor do diâmetro, sendo que a altura nunca deve ser menor que 80% nem maior que 150% do diâmetro do vaso. Para a medição da densidade da biomassa, escória e cinzas volantes foi utilizado um copo plástico de 1000 mL, cuja altura era 116% o valor de diâmetro (120 x 103 cm). A matéria a ser medida a densidade foi colocada no recipiente e o excesso removido para que a superfície ficasse o mais plana possível, sem esforço de compactação. A equação utilizada para determinação da densidade foi:

$$d = \frac{(m_T - m_R)}{V_R} \quad (5.1)$$

Onde:

$d$  : densidade (g/L ou kg/m<sup>3</sup>);

$m_T$  : massa total, recipiente e cinzas ou biomassa (g);

$m_R$  : massa do recipiente (g);

$V_R$  : volume (L).

Para análise de umidade, realizadas com a biomassa e cinzas da caldeira, foi utilizada a metodologia de secar em estufa com temperatura controlada em 103±2°C pelo tempo necessário até obtenção de peso constante (NBR 7190/1997 item B5,

conforme LOGSDON e CALIL, 2002). A equação que define o teor de umidade é dada por:

$$U = 100 \cdot \frac{(m_{MU} - m_{MS})}{m_{MU}} \quad (5.2)$$

Onde:

$U$  : teor de umidade (%)

$m_{MU}$  : massa de material úmido (g)

$m_{MS}$  : massa de material seco (g)

Para análise do teor de cinzas da biomassa e das cinzas de caldeira foi utilizada a metodologia apresentada na norma NBR 8289/1987 conforme apresentada em SANTOS *et al* (2009). As amostras foram incineradas em Mufla a 800°C por 60 minutos, sendo o resultado calculado da seguinte maneira:

$$Cz = 100 \cdot \frac{(m_{MS} - m_{CS})}{m_{MS}} \quad (5.3)$$

Onde:

$Cz$  : teor de cinzas (%)

$m_{MS}$  : massa de material seco (g)

$m_{CS}$  : massa de inorgânicos secos (g)

#### 5.4 Análise da Biomassa e seus Efeitos na Geração de Cinzas

Para avaliar a influência da qualidade do cavaco (umidade e densidade) na geração de cinzas foi realizado um acompanhamento durante 38 dias (24/05/2012 a 30/06/2012) realizando seis medições diárias (a cada quatro horas, iniciando às 2h da manhã) de umidade e densidade. Neste período foram monitoradas também algumas outras variáveis para posterior correlação com as cinzas, como, por exemplo, a vazão mássica de cavaco. A vazão mássica de cavaco alimentada na caldeira é obtida por uma balança integradora da Toledo instalada nas correias transportadoras. O consumo anual de cavaco de *Pinus taeda* na Caldeira 2 é de 142.000 ton. A umidade foi realizada utilizando 100 g de cavaco base úmida, secado

até peso constante em estufa a  $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ . A densidade foi realizada pesando um volume de 1,0 L de cavaco.

Para complementar as análises para avaliação das influências na geração de cinzas foram realizadas medições de teor de monóxido de carbono (CO) nos gases de queima. Para a medição de CO foi utilizado um medidor de gases tipo SPRINT 2000 (Figura 16) devidamente calibrado.



FIGURA 16 – MEDIDOR PORTÁTIL DE GASES MOD. SPRINT 2000 DA CONFOR.  
Fonte: Arquivo do Autor

Além das análises de umidade e densidade, foram realizadas análises de teor de cinzas com o cavaco no próprio laboratório da empresa. Para estas análises foram coletadas 10 amostras em pontos diversos do estoque de biomassa. Para análise do percentual de cinzas (conteúdo inorgânico), as amostras foram incineradas em Mufla a  $800^{\circ}\text{C}$  por 60 minutos, conforme norma NBR 8289/1987 (SANTOS *et al*, 2009).

Como referência para análise da medição de cinzas no cavaco segue uma compilação de análise realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas no ano de 2002, disponíveis em arquivos no histórico da Caldeira 2 (Tabela 3). Os valores são resultados de uma média dos valores de cavaco seco, madeira *in natura* e maravalha.

TABELA 3 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DE CAVACOS DE *Pinus taeda*.

Propriedade	Média	Desvio padrão	Desbaste de painéis	Maravalha	Cavaco seco	Cavaco
Carbono (%) – BS <sup>1</sup>	50,60	0,67	50,76	49,92	51,62	50,1
Hidrogênio (%) – BS	5,89	0,10	5,94	6,00	5,72	5,89
Nitrogênio (%) – BS	0,39	0,04	0,33	0,43	0,38	0,4
Oxigênio - calc. (%) – BS	42,98	0,60	42,77	43,55	42,08	43,51
<b>Cinzas (%) – BS</b>	<b>0,18</b>	<b>0,04</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
Pcs (kcal/kg) – BS	4863,8	<b>83,7</b>	4947,4	4780,1	4947,4	4780,1
Umidade amostra (%)	-	-	16	15	36	41

Fonte: Análises 895 612 (613, 614 e 615) realizadas no IPT em 14 de Novembro de 2002.

<sup>1</sup> BS: Percentual em base seca, ou seja, desconsiderando o teor de umidade do material.

Foi medida a temperatura da fornalha em cinco ocasiões para avaliação se havia condição de não atingir a temperatura de formação de coque. Para isso foi utilizada câmara termográfica, medindo a temperatura em cada uma das seis bocas (portas) de lenha. Foi utilizado o valor médio de cada medição.

Para análise de alguns dados que exigia uma abordagem quantitativa foi utilizada a correlação de Pearson. As variáveis analisadas por Pearson para avaliação das influências na geração de cinzas foram: número de *bags* gerados por dia, teor de CO, umidade, densidade e consumo específico de cavaco. A análise quantitativa das influências na geração de escórias foi avaliada utilizando as seguintes variáveis: velocidade do ventilador, relação ar / cavaco, umidade e consumo específico de cavaco. Também foi utilizada a correlação de Pearson para analisar a influência da umidade da biomassa na temperatura da fornalha.

Segundo LIRA (2004 p. 41) o Coeficiente Linear da Correlação de Pearson ( $\rho$ ) é interpretado como um indicador que descreve a interdependência entre as variáveis  $x$  e  $y$ , onde  $y = a.x + b$ , sendo  $a$  e  $b$  constantes. No caso de  $\rho$  ser 1 ou -1 a correlação é linear perfeita, sendo que se o valor de  $\rho$  for 0 não há correlação. Na prática  $\rho$  pode ter infinitos valores, entre -1 e 1.

Segundo CALLEGARI e JACQUES (2003, p. 90 *apud* LIRA 2004) o coeficiente  $\rho$  pode ser avaliado qualitativamente da seguinte forma:

Se  $0,00 < |\rho| < 0,30$ , existe fraca correlação linear

Se  $0,30 < |\rho| < 0,60$  , existe moderada correlação linear

Se  $0,60 < |\rho| < 0,90$  , existe forte correlação linear

Se  $0,90 < |\rho| < 1,00$  , existe correlação linear muito forte

### 5.5 Análise e Quantificação de Cinzas Retidas nos Multiciclones

Em um primeiro momento buscou-se determinar a classificação das cinzas dos multiciclones quanto a resíduo sólido. As cinzas foram caracterizadas no Laboratório TECLAB em Julho de 2012. A classificação do resíduo tem base na Norma NBR/ABNT 10.004 – Resíduos Sólidos, 30/11/2004, sendo complementado pelas Normas NBR 10.005 (Lixiviação de Resíduos – Procedimento); NBR 10.007 (Amostragem de Resíduos – Procedimento) e NBR 10.006 (Solubilização de Resíduos – Procedimento).

Para caracterização dos resíduos foi feita a análise de toxicidade (*Vibrio fischeri*) pelo método NBR 15411-1/06 e coliformes. Também foram realizados os ensaios de lixiviação e solubilização. O ensaio de solubilização visa à adequação dos resíduos pela Organização Mundial de Saúde, complementados pelo Padrão Brasileiro de Potabilidade da Água, Portaria N. 518 / ANVISA de 25 de março de 2004. Os parâmetros analisados são de acordo com o Anexo G (NBR 10.004) – Padrões para ensaio de solubilização.

O ensaio de lixiviação visa atender os parâmetros baseados no Anexo F – Concentração – Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação (NBR 10.004).

Além de buscar classificar as cinzas dos multiciclones, foram coletadas 10 amostras em diferentes *bags*. Inicialmente os *bags* selecionados foram medidos quanto à altura e perímetro (circunferência) para obtenção do volume médio dos *bags*. Estas amostras foram analisadas no laboratório da empresa nos seguintes parâmetros:

- Análise de densidade das cinzas, utilizando volume de 250 mL;
- Análise do teor de umidade nas cinzas mantendo a amostra na estufa em temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até obtenção de peso constante;

- Análise do teor de cinzas em Mufla a 800°C por 60 minutos (NBR 8289 *apud* SANTOS *et al.*, 2009);
- Análise do percentual de fuligem com uma peneira de 150 Mesh Tyler da BEUNER, diâmetro de passagem de 0,106 mm (106 µm), para avaliação do volume de cinzas que pode ser reinjetado na fornalha. Foi calculado o percentual mássico de material que fica retido na peneira.
- Análise de pH da amostra de cinzas diluída em água destilada a 4% em massa.

## 5.6 Análise de Perda de Cinzas como Material Particulado

Os dados de remoção de cinzas nos multiciclones estão intimamente ligados à emissão de material particulado. O balanço de massa não fecha apenas com as cinzas dos multiciclones e a escória dos cinzeiros, é preciso saber também a quantidade de material que se perde através da chaminé. Além disso, conhecendo as emissões de material particulado e o volume de cinzas no *bag* é possível obter a eficiência dos ciclones.

Para obtenção da perda anual de cinzas pela chaminé foi realizada uma estimativa através dos valores de vazão de gás obtida durante o experimento de 24/05/2012 a 30/06/2012. Para o valor do teor de material particulado nos gases foi utilizado uma média de duas medições realizadas pela SIMILAR Ambiental (19/04/2011 e 22/06/2012). A medição de material particulado é relativamente complexa (NBR 12827), requerendo equipamentos específicos (a SIMILAR utiliza amostrador isocinético Gravimat – mod. SHC 502 – da SICK-MAIHAK).

## 5.7 Quantificação das Escórias

A escória (Figura 17) é um dos três tipos de cinzas geradas em uma caldeira de biomassa que precisa ser removido do sistema. Na Caldeira 2 a escória é retirada nos cinzeiros após a basculagem das grelhas. Após a remoção das cinzas do cinzeiro da caldeira esta é deixada ao ar para resfriar e ensacadas no Bag.





FIGURA 17 – ESCÓRIA EM FORMA DE “CASCÕES” RETIRADA DO CINZEIRO DA CALDEIRA 2.  
Fonte: Arquivo do Autor

Para quantificação das cinzas do cinzeiro foi utilizado o volume e quantidade de carrinhos de cinzas (Figura 18) no período 24/05/2012 a 30/06/2012 e medida a densidade.



FIGURA 18 – CINZEIRO DA CALDEIRA 2 E CARRINHO DE TRANSPORTE E QUANTIFICAÇÃO DE ESCÓRIA.  
Fonte: Arquivo do Autor

## 5.8 Balanço Mássico de Cinzas na Caldeira 2

A Figura 19 permite compreender como ocorrem as entradas e saídas na linha de gases. O balanço mássico com relação às cinzas geradas na Caldeira 2 é dado pelas equações 5.4 e 5.5, utilizando conceitos da Figura 19.



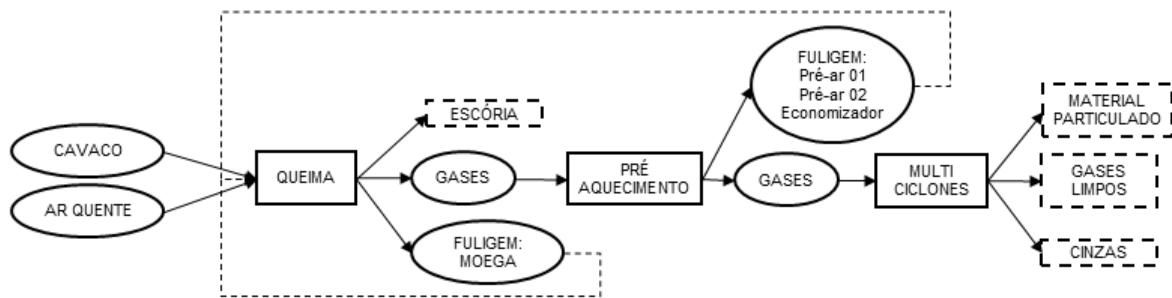


FIGURA 19 – MACROFLUXO DO SISTEMA DE GERAÇÃO, RECIRCULAÇÃO E EMISSÃO DE CINZAS.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

$$W_{Cav}^{cinzas} + MO_{arraste} = W_{esc}^{cinzas} + W_{MC}^{cinzas} + W_{cha} \quad (5.4)$$

$$MO_{arraste} = W_{esc}^{cinzas} + W_{MC}^{cinzas} + W_{cha} - W_{Cav}^{cinzas} \quad (5.5)$$

Onde:

$MO_{arraste}$ : matéria orgânica arrastada junto às cinzas (t/ano)

$W_{Cav}$ : Vazão mássica de cavaco (t/ano)

$W_{esc}$ : Vazão mássica de escória (t/ano)

$W_{MC}$ : Vazão mássica retina nos multiciclones (t/ano)

$W_{cha}$ : Vazão mássica emitida na chaminé, material particulado (t/ano)

A execução do balanço de massa leva em consideração que as cinzas da caldeira (total) consiste no material inorgânico proveniente da biomassa e também a certo residual de material orgânico que escapa junto aos gases e cinzas dos multiciclones.

Além do balanço mássico global, foi realizado um balanço parcial para avaliar a quantidade de material sólido (cinzas) que sai da fornalha e é reinjetado. A Figura 19 apresenta as linhas de recirculação e as saídas de cinzas. O objetivo deste balanço é quantificar estas linhas, para obter o volume de material que é reaproveitado na queima. Para realização do balanço, foram utilizados dados do histórico da caldeira, sendo três amostragens de cada ponto. A vazão mássica das

linhas foi calculada através do volume por unidade de tempo, multiplicadas pela respectiva densidade.

### 5.9 Disposição de Cinzas e Análise do Solo

Neste tópico o objetivo é apresentar como tem sido realizada a utilização de cinzas na agricultura no período 2011-2012.

Desde 2011 está sendo desenvolvido um projeto de utilização das cinzas da Caldeira 2 em terras agricultáveis pela MLCV Agricultura (SÉKULA, 2012). O projeto está sendo realizado na Fazenda Três Capões, localizada no município de Guarapuava, BR 277, km 364. Foram definidos talhões para a aplicação de cinzas conforme indicadores de pH, participação do cálcio (Ca) na Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e quantidades de cálcio, potássio (K) e magnésio (Mg). (SÉKULA, 2012). As amostras para análise foram coletadas entre 0 e 20 cm de profundidade no solo.

TABELA 4 – CINZAS APLICADAS POR HECTARE EM 2011

Talhão	Área (ha)	Cinzas t/ha	Total de cinza por talhão (t)
1+2	46,3	2,2	103
5	28,4	2,2	61
11+12	31,3	2,9	92
14	24,1	2,6	63
15+16+18	81,6	0,4	36
20	180	1,0	188

Fonte: SÉKULA (2012)

O solo é classificado como Latossolo Bruno com textura argilosa (40 – 60% de argila), pH abaixo de 6,5, fertilidade com parâmetros monitorados anualmente. A área de estudo está localizada na Mesorregião Centro-Sul do Estado do Paraná (SÉKULA, 2012). O clima da região é o temperado Cfb, caracterizado por verões amenos e incidência de geadas severas, sem estação seca bem definida. A precipitação média anual é de 1961 mm (THOMAZ & VESTENA, 2003 *apud* SÉKULA, 2012).

A área em estudo para aplicação das cinzas (talhões apresentados na Tabela 4) é utilizada para “plantio direto, tendo como culturas de verão milho e soja, plantados diretamente sobre a palha. Como cultura de inverno têm sido utilizadas

pequenas áreas de trigo, ficando a maior parte do solo com cobertura vegetal” (SÉKULA, 2012, p.9). Ainda de acordo com SÉKULA (2012), todos os anos são realizadas análises de fertilidade química do solo, procedendo-se, quando necessário, com a calagem, visando reposição de Ca, Mg e neutralização de acidez.

A quantidade de cinzas aplicadas na agricultura levou em conta a participação do cálcio na Capacidade de Troca de Cátions (CTC) do solo para 50%. A disposição das cinzas em terras agricultáveis foi feita com um caminhão tipo Munck e um trator acoplado a uma cascalhadeira (Figura 20). O sistema de aplicação de cinza no solo é bastante simples. O caminhão Munck é utilizado para transportar as cinzas da caldeira até o talhão escolhido para espalhar as cinzas e carregar a cascalhadeira. Este equipamento através de uma corrente leva continuamente as cinzas até os difusores, que por sua vez são discos que lançam as cinzas no solo (Figura 21).



FIGURA 20 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA APLICAÇÃO DE CINZAS NAS TERRAS.  
Fonte: Arquivo do Autor



FIGURA 21 – CINZAS SENDO APLICADAS EM TERRAS AGRÍCOLAS.  
Fonte: Arquivo do Autor

TABELA 5 – RESULTADOS ALCANÇADOS NA MLCV AGRICULTURA APÓS APLICAÇÃO DE CINZAS

ANO	TALHÃO	pH CaCl <sub>2</sub> <sup>1</sup>	M.O	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	S
			g/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	cmol/dm <sup>3</sup>	cmol/dm <sup>3</sup>	cmol/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>
2011	1+2	<b>5,52</b>	41,82	7,8	0,31	4,59	1,92	0,59
2012	1+2	<b>5,6</b>	41,6	3,3	0,63	5,2	2,3	4,2
2011	5	<b>5,37</b>	40,4	9,92	0,32	4,08	1,81	2,77
2012	5	<b>5,2</b>	42,9	2,9	0,63	3,3	3,4	4,4
2011	11+12	<b>5,49</b>	45,07	5,34	0,25	4,64	1,96	1,58
2012	11+12	<b>5,8</b>	43,6	11	0,61	5,6	3,4	4,9
2011	14	<b>4,82</b>	46,69	7,63	0,28	3,92	1,6	30,11
2012	14	<b>5,4</b>	51	2,1	0,43	5,8	4,1	5,8
2011	15+16+18	<b>5,66</b>	41,21	9,24	0,4	5,51	1,77	0,99
2012	15+16+18	<b>6,08</b>	34,92	11,42	0,32	5,57	1,25	0,41
2011	20	<b>5,17</b>	48,31	11,7	0,4	4,63	1,72	7,73
2012	20	<b>5,4</b>	42,3	2,7	0,47	4,7	4	5,3

<sup>1</sup> O pH foi realizado utilizando solução de CaCl<sub>2</sub> para melhorar a precisão e confiabilidade, fornecendo leituras mais estáveis (RONQUIM, 2010, p.14).

Cont. Tabela 5.

ANO	TALHÃO	H+Al	Mn	Fe	Cu	Zn	B
		cmol/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>
2011	1+2	4,57	16,51	20,98	1,63	3,38	0,9
2012	1+2	4,36	30,4	39,2	1	2,1	0,48
2011	5	4,71	15,58	22,76	1,63	4,44	0,84
2012	5	5,82	22,6	49,4	1,2	1,9	0,35
2011	11+12	4,68	22,12	18,7	4,11	1,94	0,9
2012	11+12	4,14	65,9	41,4	2,2	3,7	0,43
2011	14	6,64	20,51	31,68	5,21	18,49	0,78
2012	14	6,32	29,9	53	1,4	1,4	0,27
2011	15+16+18	4,51	18,34	18,9	4,64	3,71	0,3
2012	15+16+18	4,68	17,97	24,36	4,71	2,39	0,48
2011	20	5,72	17,89	26,07	3,66	3,16	0,6
2012	20	4,73	30,4	38,8	1,8	3	0,39

Fonte: SÉKULA (2012)

É importante ressaltar que não é objetivo do trabalho avaliar com profundidade a destinação de cinzas na agricultura e sim trazer alguns resultados para ilustrar sua aplicação. O foco principal do trabalho é a geração de cinzas e reutilização na própria caldeira.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e respectivas análises estão na seguinte sequência:

- i. Análise da biomassa (cavaco de *Pinus taeda*) e influência na geração de cinzas. Além da análise dos efeitos da biomassa na geração de cinzas é avaliada a influência dos parâmetros de processo.
- ii. Análise das cinzas de caldeira e quantificação do volume passível de destinação à agricultura (retidos no multiciclones e escórias).
- iii. Quantificação e análise de influências na geração de escórias.
- iv. Estimativa da emissão de cinzas na chaminé e possíveis influências.
- v. Balanço de massa de geração, reutilização, retenção e emissão de cinzas.
- vi. Utilização de cinzas na agricultura, resultados de análise do solo antes e após a dosagem do resíduo.
- vii. Minimização da geração de cinzas através da redução de arraste na fornalha e reutilização da fração orgânica (grossa) dos multiciclones.

### 6.1 Análise da Biomassa e seus Efeitos na Geração de Cinzas

A biomassa possui um teor de cinzas associado a sua constituição química. Dessa forma, a geração de cinzas é inerente ao processo, no entanto o percentual em relação à quantidade de cavaco pode ser bastante influenciado pelas variáveis de processo. A Tabela 6 mostra que há uma forte relação entre a geração de cinzas (medida em *bags*) e o consumo de cavaco. Esta correlação é bastante óbvia, no entanto o valor de correlação linear que resultou destas duas variáveis foi de 0,77, onde, em tese, retirando as incertezas de medição, deveria ser 1,0. Dessa forma, é possível afirmar que há mais variáveis envolvidas no volume gerado de cinzas, que simplesmente o teor intrínseco de cinzas do cavaco.

TABELA 6 – CORRELAÇÃO LINEAR PARA ALGUMAS VARIÁVEIS RELACIONADAS AO PROCESSO DE GERAÇÃO DE CINZAS

Correlação Pearson	CO	Umidade cavaco	Densidade cavaco	Consumo específico <sup>1</sup>	Consumo biomassa
<i>Bags</i>	<b>0,53</b>	<b>0,54</b>	<b>0,61</b>	<b>-0,55</b>	<b>0,77</b>
CO		0,44	0,59	-0,58	0,59
Umidade cavaco			0,71	-0,78	0,71
Densidade cavaco				-0,83	0,73
Consumo específico					-0,82

<sup>1</sup> Consumo específico de vapor é a razão entre o consumo de cavaco em toneladas pela produção de vapor em toneladas.

A Tabela 6 apresenta os valores de correlação linear simples entre algumas das principais variáveis relacionadas à geração de cinzas, retiradas dos multiciclones. Uma forte correlação linear é verificada entre *Bags* (que indica a geração de cinzas) e a densidade do cavaco (0,61). A densidade do cavaco, uma vez que a madeira queimada na caldeira é sempre *pinus*, denota a qualidade do cavaco: quanto maior a densidade, pior a queima e maior a geração de cinzas. No período analisado, 38 dias, a densidade oscilou entre 327 e 419 kg/m<sup>3</sup> (21,9% de diferença), média de 372 kg/m<sup>3</sup> e desvio padrão de 21. A densidade é fortemente influenciada pela umidade do cavaco (0,71) e percentual de serragem. A explicação para este caso, assim como a influência da umidade do cavaco (correlação de 0,54 com a geração de cinzas), é o tempo de residência, que afeta a queima da serragem e a combustão do coque.

Algumas das maiores correlações obtidas são pouco relevantes para análise da geração de cinzas. É o caso da correlação entre densidade e consumo específico (-0,83) e consumo específico e consumo de biomassa (-0,82). No primeiro caso o maior peso específico (densidade) leva a um maior consumo de cavaco. O segundo caso é uma correlação óbvia, quanto maior o consumo específico (geração de vapor / consumo de cavaco) menor a consumo de biomassa.

De acordo com a Tabela 6, o consumo específico possui correlação moderada com a geração de cinzas. No caso do cavaco ter a mesma qualidade (umidade) o consumo específico de cavaco não teria grande influência no número de *bags* gerados. No entanto, o consumo específico possui correlação forte (-0,78)

com a umidade do cavaco. Dessa forma, indiretamente o consumo específico influencia negativamente na geração de cinzas.

O teor de monóxido de carbono (CO) é o melhor parâmetro para avaliação da queima incompleta, esta de grande influência na geração de cinzas. A correlação entre CO e número de *bags* diários é de 0,53, ou seja, correlação moderada. A explicação do maior valor de CO gerar um maior volume de cinzas está no fato da oxidação do carbono a CO não consumir completamente o material.

A queima (processo químico) só ocorre após a evaporação da água da lenha (processo físico). O maior teor de umidade exige um maior tempo de residência do cavaco na fornalha. No entanto, o sistema de exaustão mantém a fornalha sob vácuo, fazendo com que parte do material parcialmente queimado seja arrastado para seção de exaustão. O resultado é queima incompleta e maior geração de cinzas. A serragem é naturalmente prejudicada pelo arraste do exaustor, pois possui tempo de residência muito diferente do cavaco.

Com relação à combustão do coque, ocorre que a queima é desenvolvida em passos, sendo que a fração de cavaco consumida precisa de certo nível de temperatura (900°C) para que haja a combustão do coque. A maior umidade reduz a temperatura da fornalha, não permitindo a completa combustão do coque. Este é, então, arrastado e sai nos multiciclones e chaminé. A Tabela 7 apresenta as medições de temperatura na fornalha, mostrando que em algumas ocasiões pode haver dificuldades para a combustão do coque. Na Tabela 7 também está representada a umidade do cavaco, a real causa do resultado de temperatura da fornalha.

TABELA 7 – TEMPERATURA DA FORNALHA E UMIDADE DA BIOMASSA NA CALDEIRA 2

DATA	Temperatura da fornalha (°C)	Umidade (%)
31/05/2012	980	55,9
01/06/2012	940	54,7
04/06/2012	690	58,1
05/06/2012	837	55,9
15/06/2012	993	55,3
Correlação Pearson		-0,86

A correlação linear entre temperatura da fornalha e umidade do cavaco ficou igual a -0,86, ou seja, há uma forte influência negativa da umidade do cavaco na temperatura da chama. Dessa forma, para minimização da geração de cinzas e emissão de material particulado é fundamental o controle da qualidade do cavaco. Valores muito elevados de umidade desta biomassa (acima de 57%) podem levar a maior geração de cinzas de caldeira.

A maior umidade do cavaco também interfere no *over-fire*, sendo necessário maior volume de combustível na fornalha, prejudicando a eficiência do "over fire" (ventilador secundário).

## 6.2 Análise e Quantificação de Cinzas Destinadas a Agricultura

A Tabela 8 apresenta uma análise granulométrica parcial (foram utilizadas apenas peneiras que tivessem significado para o experimento) das cinzas destinadas para a agricultura de uma amostra em um determinado *bag*. A fuligem, que consiste em partículas que ficaram retidas na peneira, Foi quantificada em 35% do volume total de cinzas. Este valor foi de 56,3% em média nas 10 amostras coletadas para o estudo. Os valores apresentam a quantidade de material que poderia ser reaproveitada na caldeira, ao invés de ir para a agricultura. Tomando-se como referência a Tabela 8, para peneira de 150 mesh um total de 35% do material retirado nos multiciclones poderiam ser reinjetados. Destes 35% que poderiam ser reinjetados na caldeira, apenas 43,5% não seria queimado, uma vez que é material inorgânico.

TABELA 8 – ANÁLISE PARCIAL DO TEOR DE CINZAS EM FUNÇÃO DA GRANULOMETRIA

Peneira (MESH Tyler)	Peneira (mm)	Cinza grossa (%)	Teor de cinzas (%)
20	0,850	2,6	7,1
32	0,500	4,8	12,5
150	0,106	35	43,5

Com relação à Tabela 9, resíduo de queima da caldeira retirado nos multiciclones, possui 69,5% de teor inorgânico (cinzas), ou seja, 30,5% ainda



poderiam ser reaproveitados como combustível, reinjetando-o na fornalha. Para queima destes 30,5% é reinjetada a parte caracterizada como fuligem (cinzas com mais de 0,106 mm de diâmetro), 56,3% de resíduo de queima. A parte restante, caracterizada aqui como cinza fina (passa pela peneira de 150 mesh), responde então por 43,7%, a qual já não permite aproveitamento energético, tendo seu melhor aproveitamento na agricultura.

TABELA 9 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA BÁSICA DO RESÍDUO DE QUEIMA

Bag	Umidade (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de cinzas (%) <sup>1</sup>	pH	Cinzas finas (%) <sup>2</sup>	Fuligem (%) <sup>3</sup>	Volume Bag (m <sup>3</sup> ) <sup>4</sup>
1	3,6	227,5	63,8	11,9	49,74	50,26	1,08
2	0,84	555,0	83,0	11,9	54,22	45,78	1,31
3	0,63	421,3	77,0	12,0	50,50	49,50	1,14
4	3,7	205,3	62,0	11,8	37,65	62,35	1,03
5	2,8	166,3	51,0	12,0	29,09	70,91	1,29
6	3,3	302,3	75,0	11,2	36,45	63,55	1,08
7	6,1	310,3	78,2	11,6	41,71	58,29	1,15
8	29,7	229,0	69,0	11,0	43,75	56,25	0,96
9	8,8	254,7	58,0	12,0	50,00	50,00	1,05
10	3,8	292,0	78,3	11,3	44,32	55,68	1,04
<b>Média</b>	<b>6,3</b>	<b>296,4</b>	<b>69,5</b>	<b>11,7</b>	<b>43,7</b>	<b>56,3</b>	<b>1,11</b>

Notas:

<sup>1</sup> Cinzas: teor de material inorgânico presente na amostra (percentual em relação ao total da amostra).

<sup>2</sup> Cinzas finas: resíduo de queima que passa por uma peneira 150 mesh.

<sup>3</sup> Fuligem: resíduo de queima que é retido em uma peneira 150 mesh.

<sup>4</sup> Volume bag: volume de cada unidade de armazenagem de cinzas que é retirada da caldeira.

A análise das cinzas da Caldeira 2, realizadas no laboratório TECLAB Tecnologia em Análises Ambientais, que tem os resultados apresentados em APÊNDICE 3, mostrou que o resíduo não apresentou nenhum indício de patogenicidade, reatividade e toxicidade para a meio ambiente e saúde pública. Pelo relatório EC 475 a amostra apresenta toxicidade FT = 2, sendo que algumas referências como Portaria N.19/2006, CEMA 81/2010 o limite é FT 8. Segundo o relatório da TECLAB, a amostra não possui potencial patogênico não apresentando vírus e bactérias dentro do limite aceitável até para fins agrônômicos conforme BA-2087. O Extrato Lixiviado atendeu os parâmetros do Anexo F (NBR 10004:2004) e

não foram evidenciados metais significativos na massa bruta, classificando as cinzas como **CLASSE II A** (Não perigoso - Não inerte).

A quantificação das cinzas nos multiciclones é apresentada na Tabela 10, sendo que o balanço tem origem no esquema apresentado na Figura 19. Em média, a cada dia são retirados nos multiciclones da caldeira um total de 4,2 *bags*, totalizando 1.377 kg/dia. Para cálculo do peso de sólidos foram utilizados o valor de densidade da Tabela 9 e volume e geração de *bags* (Tabela 16 no APÊNDICE). É considerado o regime de produção 24h durante 360 dias no ano.

TABELA 10 – QUANTIFICAÇÃO DAS CINZAS RETIDAS NOS MULTICICLONES

<b>Cinzas (Multiciclones)</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Bags	4,2	unidades/dia
Geração diária	4,64	m <sup>3</sup>
Geração diária	1377	Kg
Geração anual	1.672	m <sup>3</sup>
Geração anual	496	T

A Tabela 10 mostra que são retirados anualmente 496 ton de cinzas dos multiciclones.

As cinzas destinadas para a agricultura constituem no volume retirado nos multiciclones e no cinzeiro da caldeira (escórias). O total entre as cinzas volante dos multiciclones (496 t) e as cinzas pesadas (a quantificação das escórias é dada no item 6.4, resultando em 254 t) que vão para o solo é de 750 t anuais.

### 6.3 Geração de Escórias: Possíveis Causas

Dentre as perdas por cinzas (cinzeiro, multiciclones e chaminé), a escória é a de maior dificuldade para redução, uma vez que é constituída de material inorgânico. Em alguns momentos as cinzas vitrificam no grelhado, dificultando a passagem do ar e, quando efetuada a basculagem, trazendo grandes transtornos operacionais para sua remoção. Essa fração das escórias é chamada de cascão.

O volume de escórias gerado pode ser vistos na Tabela 11. A geração diária é 704 kg/dia, sendo 254 ton anuais (considerando 360 dias anuais, já que 5 dias é parada para manutenção).

TABELA 11 – QUANTIFICAÇÃO DAS CINZAS RETIRADAS DO CINZEIRO (ESCÓRIA)

<b>Escória</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Densidade (esc. grossa)	880	Kg/m <sup>3</sup>
Densidade (esc. fina)	945	Kg/m <sup>3</sup>
Carrinho	6,2	/dia
Geração diária	0,772	m <sup>3</sup>
Geração diária	704,3	Kg
Geração anual	254	Ton

A geração de escória na Caldeira 2 (Tabela 11) não correlaciona com umidade e densidade (propriedades físicas do cavaco) devido ao fato de ser constituído basicamente de material inorgânico. Entre 60 e 90% das cinzas da biomassa são arrastadas junto aos gases (ficando entre 10 e 40% das cinzas depositadas no grelhado). Portanto, no máximo 40% de todo o 0,18% da biomassa alimentada na caldeira saíam como escórias. O restante sai pela chaminé ou é recuperado nos multiciclones. A Tabela 13 mostra que o total de inorgânicos no cavaco da Caldeira 2 é 580,6 t/ano, portanto, em tese as escórias somariam entre 58,1 e 232 t/ano. Como a Tabela 11 mostra que a geração de escórias é de 254 t/ano, vê-se que apenas 56,2% das cinzas são arrastadas. O baixo percentual arrastado é característica da queima em camada (sobre a grelha). Além disso, o nível de depressão (vácuo) que se trabalha na Caldeira 2 é baixo (-2 mmca), fazendo com que o arraste seja minimizado.

Além do teor de cinzas intrínseco da biomassa, a geração de escórias é influenciada pelos seguintes parâmetros de processo:

- Disponibilidade de ar para queima: se o ar primário (alimentado sob a grelha) for insuficiente para a queima da biomassa, as escórias passarão a se formar em maior quantidade, criando “cascões” sobre o grelhado. Quanto maior a disponibilidade de ar maior o arraste de cinzas e a não formação de “cascão” sobre o grelhado. Este fenômeno é bastante visível na prática de operação de caldeiras. A Tabela 12 mostra que este fenômeno possui uma correlação

linear moderada com a geração de escórias (colunas “velocidade do ventilador” e “relação ar / cavaco”).

- Limpeza no grelhado: A formação de “cascões” cumula da obstrução do grelhado, dificultando a passagem de ar e a formação de ainda mais escória. Para o processo de queima isto é prejudicial, pois se perde área de combustão, comprometendo a carga térmica da fornalha. Periodicamente é necessário remover a escória aderida sobre o cinzeiro. Este processo é chamado de basculagem.

TABELA 12 – AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS NA GERAÇÃO DE ESCÓRIA

<b>Correlação</b>	<b>Velocidade ventilador (%)</b>	<b>Relação Ar /Cavaco<sup>1</sup></b>	<b>Umidade do cavaco (%)</b>	<b>Densidade do cavaco (%)</b>	<b>Consumo específico</b>
Escória (n° carrinhos /dia)	-0,36	-0,43	-0,08	0,07	0,19

<sup>1</sup> Relação Ar/ cavaco: razão da dosagem de ar atmosférico pela vazão mássica de cavaco.

A formação de cinzas no grelhado (escórias) é positiva, pois são mais fáceis de remover, uma vez que não são arrastadas para a seção de gases. No entanto, a formação de cascões deve ser evitada, pois traz dificuldades para remoção na caldeira e grandes problemas na aplicação no solo.

#### 6.4 Análise da Perda de Cinzas como Material Particulado

Os valores de concentração de material particulado na Caldeira 2 em 2011 ficou de 264,1 mg/Nm<sup>3</sup> e em 2012 ficou em 111,2 mg/Nm<sup>3</sup>. Utilizando a média destes dois valores e a vazão de 40.632 Nm<sup>3</sup>/h (média de 9 medições) chega-se que a emissão de material particulado anual é de 65,9 toneladas (Tabela 13).

TABELA 13 – QUANTIFICAÇÃO DAS CINZAS EMITIDAS ATRAVÉS DA CHAMINÉ

<b>Material particulado</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Emissão	187,6	mg/N.m <sup>3</sup>
Vazão Chaminé	40.632	Nm <sup>3</sup> /h
Emissão diária	182,9	kg/dia
Emissão anual	65,9	t/ano

Segundo a SEMA 054/06 (ANEXO 02), o limite de emissões de material particulado para caldeiras até 50 MW é de 400 mg/N.m<sup>3</sup>. Como a Caldeira 2 possui

potência nominal de 48 MW os valores de material particulado encontram-se enquadrados na exigência legal. A emissão anual pela chaminé é de 183 kg/dia, sendo de 65,9 t a emissão anual (360 dias operacionais ao ano).

No caso da perda por material particulado, tanto a perda financeira quanto a contaminação do ambiente são justificativas para melhorar o processo de queima. Apesar do sistema de abatimento (multiciclones) ter o objetivo de reduzir as emissões, é no processo de queima que os resultados financeiros são alcançados.

### **6.5 Balanço das Cinzas Geradas na Caldeira**

Utilizando os cálculos dos itens anteriores, as cinzas constituem para a Caldeira 2 um passivo ambiental de 749,6 toneladas (que são as cinzas retiradas nos multiciclones, 495,6 t, e no cinzeiro, 254 t). Parte deste total não é material inorgânico (41,84% do que sai de cinzas pela chaminé e multiciclones) e sim hidrocarbonetos que não queimaram e escaparam junto às cinzas. O resultado de matéria orgânica nas cinzas é obtido conforme apresentado na equação 5.5 (materiais e métodos).

Pela equação 5.5 temos que o total de matéria orgânica nas cinzas é de 234,9 ton. Esta quantidade de matéria orgânica pode ser minimizada pelo aumento de eficiência na queima, ou seja, redução de queima incompleta.

O valor de teor de matéria orgânica advindo do balanço mássico (41,8%) é maior que o valor encontrado na análise das amostras de cinzas dos multiciclones (Tabela 9) que resultou em 30,5%. No entanto, o valor de 30,5% mede apenas o material dos multiciclones. O percentual de matéria orgânica apresentado na Tabela 1 (35,1%) mostra que a condição encontrada na Caldeira 2 pode ocorrer em outras caldeiras.

TABELA 14 – BALANÇO GLOBAL DAS CINZAS NA CALDEIRA 2

Balanço mássico	Valor	Unidade
Consumo cavaco anual (úmido)	142.000	t/ano
Umidade do cavaco	56,0	%
Teor cinzas no cavaco (base seca)	0,18	%
Inorgânicos no cavaco	580,6	t/ano
Emissões particulado (chaminé)	65,9	t/ano
Resíduo escória (cinzeiro)	254,0	t/ano
Resíduo mult ciclones	495,6	t/ano
Matéria Orgânica (chaminé e mult ciclones)	234,9	t/ano
Percentual de orgânico nas cinzas dos mult ciclones e chaminé	41,84	%

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

A proporção mássica de cinzas em emissões gasosas é de 8,10%, para a escória (cinza pesada) é 31,1% e as cinzas retidas nos mult ciclones correspondem a 60,8% (Figura 22). O percentual de cinzas volantes, portanto, é de 68,9%. Utilizando estes dados para calcular a eficiência dos mult ciclones: 88,2%. Este valor está coerente com os dados obtidos na literatura.

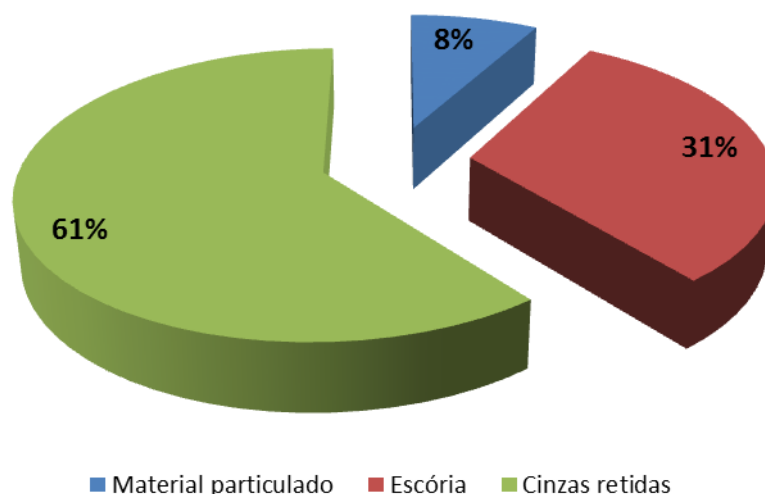


FIGURA 22 – PROPORÇÃO ENTRE AS CINZAS PRESENTES NO BALANÇO DE MASSA.

O balanço realizado diz respeito às saídas de cinzas. No entanto, há um volume de cinzas que não sai do sistema, chamada de fuligem devido ao alto teor de carbono, sendo continuamente e reinjetadas na fornalha. As cinzas que são reinjetadas são provenientes dos ciclones da seção convectiva da caldeira e dos pré-aquecedores de ar (Pré-ar 01 e 02) e água (Economizador), totalizando 04 pontos. A Figura 19 apresenta o esquema para balanço e a Tabela 15 o balanço de cinzas reinjetadas na fornalha.

TABELA 15 – BALANÇO GLOBAL E REINJETOS DAS CINZAS NA CALDEIRA 2 (GASES)

Cinzas nos gases	Moegas	Pré-ar 02	Pré-ar 01	Economizador	Multiciclones	Chaminé
Densidade cinzas (kg/m <sup>3</sup> )	990	100	90	110	-	-
Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /dia)	0,16	28,8	1,6	0,08	-	-
kg/dia	158,4	2.880	144,0	8,8	1.376,6	183,1
t/ano	57,0	1.037	51,8	3,2	495,6	65,9
Total reinjetado (t/ano)	<b>1.149</b>				-	-
Total cinzas nos gases – cinzas volantes (t/ano)	<b>1.710</b>					

Fonte: Dados de pesquisa, 2012, com base no histórico da Caldeira 2.

Juntando o valor de cinzas reinjetado na fornalha (1.149 t/ano) com a vazão mássica de material particulado da chaminé e cinzas dos multiciclones (561,5 t/ano) tem-se um total de 1.710 t/ano de material que é arrastado com os gases de queima. O percentual em relação à biomassa consumida anualmente (142.000 t) é de 1,20%. Dessa forma, conclui-se que 1,20% da biomassa alimentada para o processo de queima escapam com os gases de exaustão, devendo ser retida até o limite permitido de emissões de material particulado. Parte deste valor se perde como material particulado na chaminé, outro percentual é removido como cinzas dos multiciclones e outra parte é reinjetada na fornalha. O percentual de cinzas separado como resíduos, escórias e cinzas dos multiciclones (254 + 495,6 t), totalizam 0,53% do total de cavaco queimado anualmente na Caldeira 2.

Considerando a vazão mássica de fuligem como 4.750,9 kg/dia, a vazão volumétrica dos gases (40.632 Nm<sup>3</sup>/h, Tabela 13), tem-se que a emissão de partículas (cinza volante) na saída da fornalha é de 4.872 mg/Nm<sup>3</sup>. De acordo com

os dados apresentados da literatura, para caldeiras de queima em grelha, o valor de 4.872 mg/N.m<sup>3</sup> indica baixo arraste de partículas (lembrando que para queima de biomassa em grelha este valor varia de 5.000 a 8.000 mg/N.m<sup>3</sup>). Por outro lado, esse valor de emissão de material particulado (cinzas) é 8 vezes maior que o limite de material particulado permitido pela SEMA 054/06 (400 mg/N.m<sup>3</sup> - conforme Anexo), o que explica a necessidade de uma caldeira ter sistema de recuperação, reinjeção e retenção de cinzas. A Figura 23 apresenta a redução de cinzas após passar por cada um dos equipamentos da seção de gases.

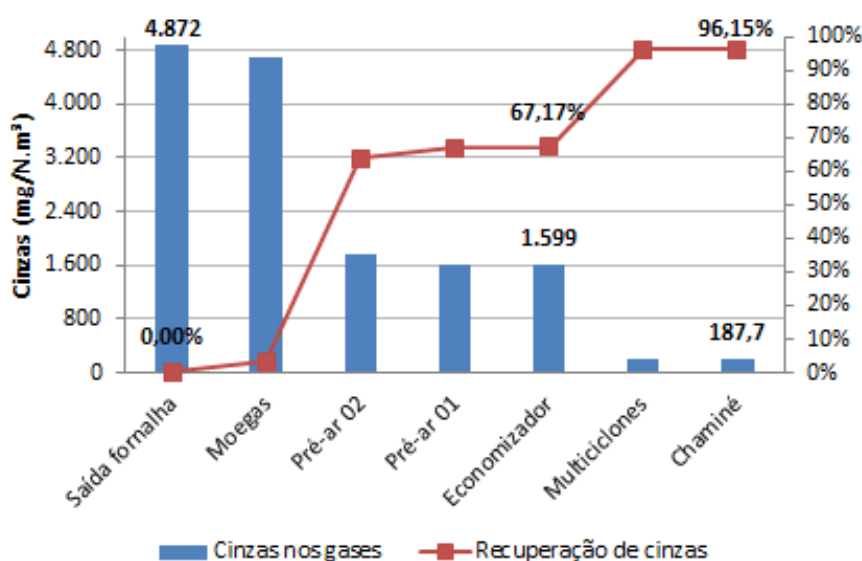


FIGURA 23 – REDUÇÃO DE CINZAS AO LONGO DA SEÇÃO DE GASES DA CALDEIRA.

Na Figura 23 é possível observar de forma clara como ocorre a redução de material particulado à medida que o fluxo de gases passa pelos equipamentos. A eficiência global do sistema em remoção de cinzas dos gases é de 96,15%, sendo que o gás sai da fornalha com 4.972 mg/N.m<sup>3</sup> e é emitido pela chaminé com concentração de 187,7 mg/N.m<sup>3</sup>.

A grande recuperação ocorre nos pré-aquecedores, sendo que o material removido é reinjetado na fornalha. Apesar de até este ponto o sistema recuperar 67,2% das cinzas arrastadas, os gases ainda possuem 1.599 mg/N.m<sup>3</sup>, sendo necessária a utilização de sistemas de retenção (abatimento) do material particulado. É possível calcular a eficiência dos multiciclones neste ponto, através da seguinte equação:



$$Eff(\%) = 100 \cdot \frac{(C_{MP}^{ent} - C_{MP}^{sai})}{C_{MP}^{ent}} \quad (6.1)$$

Onde:

*Eff (%)*: Eficiência do sistema de retenção de material particulado (%);

$C_{MP}^{ent}$  : concentração de material particulado de entrada nos multiciclones (mg/N.m<sup>3</sup>);

$C_{MP}^{sai}$  : concentração de material particulado de saída nos multiciclones (mg/N.m<sup>3</sup>).

Utilizando a equação 6.1 chega-se ao valor de eficiência do sistema de multiciclones: 88,2%.

## 6.6 Disposição de Cinzas no Solo e Análises Químicas

A dosagem média das cinzas da Caldeira 2 nas terras da Fazenda Três Capões foi de 1,9 t/ha (Tabela 4), valor inferior ao encontrado na literatura (4,9 - 15 t/ha, dependendo do tipo de cultura estudada). Conforme a literatura estudada, a dosagem de cinzas possui faixa ótima de trabalho. No entanto, mesmo com a menor dosagem de cinzas, de acordo com os resultados do estudo realizado por SÉKULA (2012) a adição de cinzas da Caldeira 2 nas terras da Fazenda Três Capões aumentou o valor de pH do solo. Além disso, colaborou com a reposição de alguns elementos (Tabela 5). Seguem os principais resultados:

- pH: aumento de 4,3%, levando o solo de acidez média (5,34) para acidez baixa (5,58). A classificação de solos quanto ao pH encontra-se na tabela 22, em Anexos. Este aumento de pH, associado a outras variáveis, pode levar a maior fertilidade do solo.
- H + Al: redução de 2,6% o valor de H e Al, o que pode aumentar a produtividade. No entanto não foi realizada análise comparativa de produtividade.
- Aumento no teor de macronutrientes no solo: O Ca aumentou de 9,3%, o K 36,6% e o Mg 41,6% suas concentrações iniciais. Isto pode ser explicado pela abundância destes metais nas cinzas, conforme mencionado na literatura. A Tabela 2 apresenta os resultados destes três macronutrientes (na forma de óxidos) como os de maior concentração nas cinzas.

Houve redução de alguns elementos, como o P, S, Cu, Zn e B, no entanto é importante lembrar que a cultura consome parte dos macro e micronutrientes presentes no solo. Naturalmente a planta absorve os nutrientes do solo incorporando em sua massa, podendo reduzir a fertilidade do solo. Como a grande influência das cinzas está principalmente no aumento de óxidos de Ca, K, Mg e Si os valores encontrados são coerentes.

Com relação à operacionalização das cinzas na agricultura, deve-se evitar lançar no solo a escória em forma de “cascões”, uma vez que seu formato e estrutura dificultam a percolação dos nutrientes no solo e podem atrapalhar o plantio.

## **6.7 Minimização da Geração de Cinzas**

### **6.7.1 Redução da Geração de Cinzas**

A redução da geração de cinzas no processo de queima está ligada a dois importantes pontos: (1) características da biomassa e (2) variáveis operacionais. Com relação à qualidade da biomassa, é fundamental atentar-se aos seguintes aspectos:

- Teor de cinzas (material inorgânico) intrínseco da biomassa: o que não for material orgânico não vai queimar, saindo da fornalha como cinzas. Cada biomassa possui uma fração de cinzas, que na prática pode variar entre 0,18 e 20%.
- Teor de umidade: reduz a temperatura da queima e aumenta a geração de material incombusto. A umidade deve ser controlada, seja através de um processo de gestão de estoque, seja na seleção de fornecedores. Uma alternativa aconselhável é a secagem ao ar da tora antes da picagem.
- Granulometria: partículas com diferentes dimensões queimam em diferentes tempos. Deve-se evitar queimar biomassa com elevado percentual de serragem, pois aumenta o arraste de partículas para a seção de gases.
- Perda de voláteis e biodegradabilidade: o combustível depois de elevado tempo de estocagem perde voláteis, aumentando o percentual de carbono fixo, requerendo maior temperatura de fornalha para queima completa. Além

da maior dificuldade em queimar biomassa com maior teor de carbono fixo, a perda de voláteis acarreta menor utilização da biomassa adquirida (perda de massa).

Assim como a característica da biomassa, os parâmetros operacionais são fundamentais para o controle de cinzas na caldeira. As seguintes variáveis devem ser verificadas:

- Depressão da fornalha (pressão negativa): a depressão não deve ser muito elevada para evitar arraste excessivo. A depressão elevada aumenta os custos de produção, pois o combustível não queima completamente, e eleva o arraste de material não queimado. No entanto, a depressão deve ser suficiente para manter a fornalha livre de retrocesso de chama (pressão positiva).
- Temperatura da fornalha: Caso a temperatura esteja abaixo de 900°C haverá dificuldade com a combustão do coque, aumentando o arraste de material não queimado.
- Ar de queima (primário e secundário): o excesso de ar deve ser suficiente para queimar os voláteis e o coque, além de impedir a formação de “cascões” no grelhado. Deve-se evitar falta de ar, para que não ocorra queima incompleta, e excesso acima da condição de projeto, para que não reduza a temperatura da fornalha.
- Acúmulo de cavaco: normalmente associado à falta de ar, ou excesso de combustível. O acúmulo de cavaco gera cascões na fornalha, dificultando a queima.
- Medição e controle de CO e O<sub>2</sub>: A concentração de CO nos gases de exaustão é um grande indicador da qualidade da queima. Altos níveis de CO indicam queima incompleta, gerando excesso de material particulado. O controle de O<sub>2</sub> é importante para que seja trabalhado na faixa ideal, evitando queima incompleta (ar reduzido) e o resfriamento da fornalha (ar em excesso).

Os pontos apresentados estão alinhados com os conceitos e resultados apresentados no trabalho. São ações que devem ser tomadas em conjunto, possibilitando o alcance de bons resultados do ponto de vista econômico (redução do consumo de biomassa) e ambiental (minimização das emissões atmosféricas e geração de resíduos sólidos).

### 6.7.2 Reutilização das Cinzas como Combustível na Caldeira (reinjeção)

O cavaco parcialmente queimado, oxidado a coque, que foi arrastado para a seção de gases de exaustão possui duas importantes características: (1) umidade muito baixa e (2) poder calorífico elevado, inversamente proporcional ao seu teor de cinzas. Na Caldeira 2 já ocorre a reinjeção de parte das cinzas, no entanto as cinzas retidas nos multiciclones são integralmente enviadas para a agricultura. A parte orgânica das cinzas poderia ser reaproveitada na fornalha da caldeira.

Calculando o material incombusto que se perde nos multiciclones:

$$W_{MC}^{cinzas} = W_{MC}^{organico} + W_{MC}^{inorganico} \quad (6.2)$$

$$W_{MC}^{cinzas} \cdot X_{MC}^{organico} = W_{MC}^{organico} \quad (6.3)$$

Onde:

$W_{MC}^{cinzas}$ : vazão mássica de cinzas nos multiciclones (t/ano);

$X_{MC}^{organico}$ : fração mássica do material orgânico nas cinzas dos multiciclones.

Como a vazão mássica de cinzas é 495,6 t/ano (Tabela 10) e a fração mássica de orgânicos é 30,5% (Tabela 9), temos que 151 ton anuais são perdidas nas cinzas dos multiciclones.

Na prática, o que pode ser recuperado é o percentual de fuligem apresentado na Tabela 9 (56,3%), cujo teor de inorgânico (Tabela 8) é de 43,5%. Dessa forma, o volume de material incombusto, fração do total de 495,6 t/ano, é 279,0 t/ano. Multiplicando este valor pelo teor de orgânico (100 – 43,5%) resulta em 157,6 t/ano de material orgânico, que é um valor muito próximo de 151 t obtidas com o outro cálculo.

Considerando que 151 t de material orgânico (carvão vegetal) pode ser reinjetado na fornalha, pode-se estimar a quantidade equivalente em cavaco de madeira. A quantidade equivalente de cavaco é dada por:

$$W_{eq}^{cavaco} = W_{MC}^{organico} \cdot \frac{P_{CS}^{carvão}}{P_{CS}^{cavaco}} \quad (6.4)$$

Onde:

$W_{eq}^{cavaco}$  : vazão mássica equivalente de cavaco (ton);

$P_{CS}$  : poder calorífico superior (kcal/kg combustível).

O  $P_{CS}$  do cavaco de *Pinus taeda* a 50% de umidade é 2.418 kcal/kg (análise realizada no TECPAR em 03/05/11 com biomassa de pinus), sendo que o  $P_{CS}$  do carvão de *pinus* 7447 kcal/kg (BRITO e NUCCI, 1984). Utilizando os valores citados, chega-se ao valor de cavaco equivalente: 465 t de cavaco. Este é o material que pode ser recuperado anualmente e utilizado como combustível.

Fazendo uma valoração aproximada do total economizado com a reinjeção da fração orgânica das cinzas dos multiciclones:

- O custo médio de cavaco de *Pinus taeda* é R\$ 80,00 a tonelada (50% de umidade).
- Calculando o potencial de ganho do volume de 465 t de cavaco:

**R\$ 37.200,00 /ano**

Este material pode ser recuperado realizando um processo de peneiramento (peneira vibratória inclinada) e reinjeção (roscas helicoidais levando o material até o ventilador já existente) do material maior que 0,106 mm (peneira 150 MESH TYLER). O total reinjetado (151 t de carvão) é correspondente a 20,1% de todo o resíduo de queima gerado na Caldeira 2 (cinza de multiciclones e escórias).

## 7 CONCLUSÕES

As cinzas de caldeira foram avaliadas quanto ao uso energético e ao potencial agrícola. Em ambos os casos pode ser observado que é possível agregar valor a esse resíduo, reduzindo custos com combustível e, quando aplicada como corretivo, melhorando a condição do solo.

As cinzas da Caldeira 2 foram analisadas quanto à presença de reativos, vírus, atividade microbiológica, toxicidade, metais pesados entre outros, e classificadas como resíduo Classe IIa (não perigoso e não inerte).

O consumo, densidade e umidade da biomassa e teor de monóxido de carbono nos gases são diretamente proporcionais à geração de cinzas. Já a temperatura da fornalha foi inversamente proporcional à geração de cinzas, notadamente influenciando no aumento de incombustos na linha de gases. No caso da geração de escórias, as grandes influências foram a disponibilidade de ar primário e a limpeza no grelhado.

As amostras de cinzas analisadas dos mult ciclones mostraram que 30,5% em massa ainda possuem dimensão de partícula, com possibilidade de utilização para queima na fornalha. O percentual de material inorgânico nestas cinzas que podem ser recuperadas foi de menos de 50%.

As cinzas que podem ser utilizadas da Caldeira 2 na agricultura, ou outro sistema de destinação, totalizaram 750 toneladas anuais, sendo 496 t retidas dos mult ciclones e 254 t retiradas no cinzeiro da caldeira. Considerando a dosagem máxima recomendada na literatura para latossolos (8 t/ha), seriam necessários anualmente 94 ha de terras agrícolas ou de florestas.

O balanço de massa das cinzas na Caldeira 2 mostrou que foi gerado um total de 815 t/ano (0,53% do total de cavaco queimado na fornalha), dividido em 61% retidas nos mult ciclones, 31% recolhidas como escórias e 8% emitidas através da chaminé. As cinzas volantes (leves) totalizaram 1,2% do cavaco (1.710 t/ano), sendo que 1.149 t/ano foi reinjetada na caldeira para concluir a queima.

A emissão de material particulado na chaminé da Caldeira 2 encontrava-se dentro dos limites estabelecidos na resolução SEMAN 054/06 (187 mg/N.m<sup>3</sup> e vazão média de 40.632 Nm<sup>3</sup>/h), lançando cerca de 180 kg/dia na atmosfera. Em relação às cinzas que arrastadas da fornalha, 96,15% foram reinjetadas ou retidas, e o percentual restante de 3,85% resultou na emissão do valor mencionado de 187 mg/N.m<sup>3</sup>. A eficiência de retenção dos multiciclones foi de 88,2%.

Foram destinadas na agricultura em média 1,9 t/ha de cinzas de caldeira. Como consequência houve incremento nos teores de Ca (9,3 %), K (36,6 %) e Mg (41,6 %) do solo. O pH do solo aumentou 4,3% comparativamente ao ano anterior, alcançando valores em torno de 5,6.

A destinação das cinzas em solos agrícolas se mostrou adequada para o caso da Caldeira 2. No entanto, é possível reter no próprio processo de geração de vapor parte deste valor agregado das cinzas, que é, na verdade, a própria matéria orgânica não queimada.

A redução da geração de cinzas foi função do cavaco e das variáveis operacionais. Ações como redução da umidade do cavaco, uniformização da granulometria, temperatura da fornalha acima de 900°C, depressão da fornalha próxima de zero, excesso de ar suficiente para a queima e controle de monóxido de carbono reduziram a geração de cinzas na caldeira. A redução destas cinzas foi possível devido menor arraste de incombustos para a seção de gases.

Além da redução de geração de cinzas, é importante que a fração arrastada na seção de gases seja separada em cinzas grossas (elevado percentual orgânico) e cinzas finas (na prática são partículas menores que 0,106 mm ou 150 MESH). As cinzas grossas devem ser reinjetadas na fornalha e as cinzas finas destinadas de acordo com o programa de destinação de resíduos sólidos. No caso da Caldeira 2 as cinzas finas (retidas nos multiciclones), junto à escória, são destinadas a agricultura.

Avaliando as cinzas dos multiciclones da Caldeira 2, verificou-se que é possível reinjetar na fornalha 30,5% deste resíduo, totalizando 151 t/ano. Este valor é equivalente a 465 ton de cavaco de *Pinus taeda*, o que pode trazer uma economia

anual em cavaco de R\$ 37.200,00. Com a reinjeção de cinzas dos multiciclones, a geração de resíduos de queima reduz em 20,1%.

A grande utilização de biomassa no Brasil com fins energéticos, associada à atual consciência ambiental da sociedade, exige que a destinação dos resíduos de queima (cinzas) esteja alinhada com o meio ambiente. Nesse cenário, as cinzas passam a trazer valor agregado em sua aplicação, seja como corretivo do solo, matéria prima na construção civil e indústria cerâmica ou participando na compostagem com materiais orgânicos. As empresas que utilizam estes conceitos não só estão reduzindo seus custos com resíduos como colaborando com a natureza e melhorando sua imagem perante a sociedade.



## 8 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se, a título de trabalho futuro, um maior aprofundamento no que diz respeito à combustão industrial do cavaco como fator crítico no controle e minimização das cinzas. A empresa estudada possui baixo arraste de cinzas, grande parte é removido como escória, no entanto para caldeiras com queima em suspensão o arraste de cinzas é mais intenso.

Apesar da questão de aplicação das cinzas como corretivo do solo ser um assunto bastante estudado no meio acadêmico, recomenda-se aprofundar na questão de influência do teor de carbono das cinzas no aumento de fertilidade. Na empresa estudada, assim como em exemplos da literatura, mais de 30% de material incombusto é arrastado com as cinzas, no entanto não há muitos trabalhos focando a parte orgânica das cinzas.

Outra questão que pode ser estudada é a sobredosagem de cinzas e seus efeitos prejudiciais. O assunto pode ser estudado avaliando influências de determinados tipos de material inorgânico ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ , etc.).

A avaliação do desempenho na agricultura da escória comparado ao desempenho das cinzas removidas no sistema de retenção de material particulado é bastante pertinente, uma vez que possuem composições relativamente diferentes.

A influência da granulometria e composição elementar como potencial corretivo do solo é outro tema a ser explorado. Neste mesmo assunto, podem-se avaliar diferentes tipos de cinzas, provenientes de diferentes tipos de biomassa.

## 9 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

BAHIA. **Manual de Operação de Aterros Sanitários**. Governo do Estado da Bahia, Companhia de Desenvolvimento Urbano do estado da Bahia (CONDER).

BALDANZI, R. F. **Disposição de Resíduos Industriais no Solo para Fins Agrícolas**. Anais do Seminário sobre Gestão Sustentável dos Solos Agrícolas – Curitiba – PR. P. 72 – 82. Seminário Gestão Sustentável dos Solos Agrícolas. UFPR, Curitiba, 2002.

BALDANZI, R. F. **Licenciamento Ambiental para Uso Agrícola de Resíduos**. Departamento de Licenciamento de Atividades Poluidoras (IAP) – s/ano, Curitiba.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Estudo da Viabilidade Técnica da Utilização de Cinzas da Queima da Casca de *Pinus* em Obras de Pavimentação Asfáltica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos. 2008.

BEN. **Balanco Energético Nacional 2010 – Ano base 2009**. Ministério de Minas e Energia, Brasil – Governo Federal e Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro, 2010.

BORLINI, M.C., MONTEIRO, S.N. **Incorporation of Solids Wastes in Red Ceramics – an Updated Review**. Revista Matéria, v.14, nº 3, p. 881 – 905, 2009. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rmat/v14n3/a02v14n3.pdf> > Acesso em: 10 Agosto 2012.

BORLINI, M.C., MENDONÇA, J.L.C.C., VIEIRA, C.M.F, MONTEIRO, S.N. **Influência da Temperatura de Sinterização nas Propriedades Físicas, Mecânicas e Microestruturais de Cerâmica Vermelha Incorporada com Cinza de Bagaço de Cana de Açúcar**. Revista Matéria, v.11, nº 4, p. 435 – 443, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v11n4/v11n4a09.pdf>> Acesso em: 10 Agosto 2012.

BORLINI, M.C., SALES, H.F., VIEIRA, C.M.F., CONTE, R.A., PINATTI, D.G., MONTEIRO, S.N. **Cinza da Lenha para Aplicação em Cerâmica Vermelha – Parte**

**I: Características da Cinza.** Artigo Revista Cerâmica 51, p. 192 – 196. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132005000300004](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000300004)>. Acesso em: 10 Agosto 2012.

BRANCO, W. **Combustão Eficiente de Biomassa.** ZETEC Ambiental. Curso ministrado em Cascavel no dia 14 de Julho de 2012a.

BRANCO, W. **Emissões em Processos de Combustão Industrial.** ZETEC Ambiental. Curso ministrado em Cascavel nos dias 13 de Julho de 2012b.

BRAND, M. A. **Fontes de Biomassa para Geração de Energia.** Apresentação. Universidade do Planalto Catarinense, Santa Catarina, 2008. Disponível em: <<http://www.solumad.com.br/artigos/201011171818441.pdf>>. Acesso em: 10 Agosto 2012.

BRAND, M. A. **Qualidade da Biomassa Florestal para o Uso na Geração de Energia em Função da Estocagem.** Tese de Doutorado apresentada ao curso de Pós Graduação em Ciências Florestais, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. UFPR, Curitiba, 2007.

BRITO, J.O., NUCCI, O. **Estudo Tecnológico da Madeira de *Pinus spp* para a Produção de Carvão Vegetal e Briquetagem.** Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”. IPEF n° 26, p. 25-30, Abril 1984. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr26/cap04.pdf>> Acesso em: 28 Agosto 2012.

BRUNSTEIN, I., BUZZINI, R. R. **Estratégias Ambientais (eco estratégias) e Estratégias de Produção - a Busca da Integração: Estudo de casos.** XIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 1999. Disponível em: <<http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15513/material/Estudo%20de%20Caso.PDF>>. Acesso em: 20 Julho. 2012.

CAMPANHARO, M., MONNERAT, P.H., RIBEIRO, G., PINHO, L.G. da R. **Utilização da Cinza de Madeira como Corretivo de Solo.** FertBio 2008. Universidade Estadual do Norte Fluminense.

CELEPAR. **LEI N° 12.493 – 22/01/1999.** Publicado no Diário Oficial n° 5430 de 05/02/1999. Disponível em: < <http://celepar7cta.pr.gov.br/SEEG/sumulas.nsf/>

72f6421141cdce2603256c2f007a9922/7658813fa00d0c3803256e990068926c?Open Document >. Acesso em: 20 Julho. 2012.

CONPACEL. **Central de Compostagem**. Consórcio Paulista de Celulose e Papel. Disponível em: [http://www.fiesp.com.br/arquivos/2009/premio\\_merito/conpacel.pdf](http://www.fiesp.com.br/arquivos/2009/premio_merito/conpacel.pdf)> Acesso em: 15 Agosto 2012.

DAROLT, M. R. e OSAKI, F. **Efeito da Cinza de Caieira de Cal sobre a Produção de Aveia Preta e no Comportamento de Alguns Nutrientes**. IX Congresso Brasileiro de Iniciação Científica em Ciências Agrárias. UFPR, Curitiba, 1989. Disponível em: <[http://www.iapar.br/arquivos/File/zip\\_pdf/darolt\\_cinzacaieira.pdf](http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/darolt_cinzacaieira.pdf)> Acessado em 16 Agosto 2012.

DAROLT, M. R. e ZAMBON, F.R.A.N. **Cinza Vegetal como Fonte de Nutrientes e Corretivo de Solo na Cultura de Alface**. Revista periódica Horticultura Brasileira Volume 11 (1), Maio 1993. UFPR, Curitiba, 1993.

FERNANDES, F., SILVA, S.M.C.P. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico - PROSAB, Universidade Estadual de Londrina (UEL). Disponível em: < <http://www.finep.gov.br/prosab/livros/Livro%20Compostagem.pdf>> Acesso em: 25/08/2012

GIMENES, J. **Estudo das Práticas de Responsabilidade Ambiental e o Conhecimento dessas pelos Trabalhadores da Área Produtiva: o Caso de uma Empresa**. Artigo de Conclusão de Pós Graduação – UNICENTRO, 2012.

IAP. **Portaria 224 – Critérios para Exigência e Emissão de Autorizações Ambientais para as Atividades de Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. Portaria IAP N° 224, de 05 de Dezembro de 2007. Disponível em: <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao\\_ambiental/Legislacao\\_estadual/PORTARIAS/PORTARIA\\_2007\\_224.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/PORTARIAS/PORTARIA_2007_224.pdf)> Acesso em: 20 Agosto 2012.

KRAEMER, M. E. P. **Resíduos Industriais e a Questão Ambiental Associada a Contabilidade Aplicada ao Ambiente Natural**. Revista Catarinense da Ciência Contábil. Santa Catarina, 2005.

LEAL, G. C. S. G., FARIAS, M. S. S., ARAÚJO, A. F. **O Processo de Industrialização e seus Impactos no Meio Ambiente Urbano**. QUALIT@S Revista Eletrônica. ISSN 1677-4280 V7.n.1. Ano 2008.

LIMA, R.L.S, SILVA, M.I.L., JERÔNIMO, J.F., BELTRÃO, N.E.M., GOLDFARB, M. **Uso Fertilizante de Cinza Vegetal e Lodo de Esgoto para a Produção do Algodoeiro 'cv RUBI'. Parte 2 – Varáveis de Produção**. V Congresso Brasileiro de Algodão – EMBRAPA. Salvador, 2005.

LIRA, S. A. **Análise de Correlação: Abordagem Teórica e de Construção dos Coeficientes com Aplicações**. Dissertação de Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR. Curitiba, 2004. Disponível em [http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs /dissertacao\\_sachiko.pdf](http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs /dissertacao_sachiko.pdf) Acesso em: 15 abr. 2012.

LOGSDON, N.B., CALIL, C.J. **Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira**. Universidade de São Paulo (USP). Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos nº 18, p. 77-107, 2002. Disponível em < [http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee18\\_77.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee18_77.pdf)> Acesso em: 15 set. 2012.

LOPES, F.F.M., LIMA, R.L.S, ALBUQUERQUE, R.C., SILVA, M.I.L., BELTRÃO, N.E.M. **Uso Fertilizante de Cinza Vegetal e Lodo de Esgoto para a Produção do Algodoeiro 'cv RUBI'. Parte 1 – Varáveis de Crescimento**. V Congresso Brasileiro de Algodão – EMBRAPA. Salvador, 2005.

MAEDA, S., SILVA, H.D., MAGALHÃES, W.L.E. **Aplicação de cinza de Biomassa Florestal para Plantio de *Pinus taeda* em Latossolo e Cambissolo de Piraí do Sul, PR**. Comunicado Técnico – EMBRAPA. Colombo - PR, 2007.

MARTINELLI, L. C. Jr. **Geradores de Vapor**. Apostila. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. S/ Ano.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). – Brasil. Histórico Mundial da Política de Educação Ambiental. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/educacao-ambiental/politica-de-educacao-ambiental/historico-mundial>> Acesso em: 20 Agosto 2012.

MOERS, E.M., VIEIRA, A.C., FERNANDES, D.M., SOUZA, S.N.M., BARICATTI, R.A. **Caracterização da Biomassa Residual Proveniente de Resíduos Agrícolas para a Geração de Energia**. Congresso Latino Americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental – I COLASSA. UNIOESTE. Foz do Iguaçu, 2011.

NOGARA, C., CASTRO, S.S. **Segurança para Operador de Caldeira**. Apostila do Curso “Segurança na Operação de Caldeiras” do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI. Curitiba, 2010.

PERES, N. P. **Eficiência em Caldeiras na Agroindústria Canavieira**. Sociedade dos Técnicos Açucareiros Alcooleiros do Brasil - STAB. São Paulo, 2011.

PEW – Pew Environmental Group. **Who’s Winning the Clean Energy Race?** Edition 2011.

PGRS. **Programa de Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. Serviço executado pelo SENAI. Guarapuava, 2011.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel – Estudo de Caso**. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2003.

Instituto Ambiental do Paraná (IAP). **PORTARIA 224/2007**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?Conteúdo=188>> Acesso em: 20 Agosto 2012.

RIBEIRO, A. P. **Avaliação do uso de Resíduos Sólidos Inorgânicos da Produção de Celulose em Materiais Cerâmicos**. Tese de Doutorado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2010.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de Fertilidade do Solo e Manejo Adequado para Regiões Tropicais**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento – EMBRAPA. Campinas – SP, Novembro 2010. Versão digital, disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>> Acesso em: 20 Agosto 2012.

SANCHES, C. Silvia. **Gestão Ambiental Proativa**. ERA – Revista de Administração de Empresas, Jan / Mar 2000. São Paulo, vol. 40, nº 1, p. 76 - 87. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rae/v40n1/v40n1a09.pdf>>. Acesso em: 20 Julho 2012.

SANQUETTA, C. R. **Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono**. Apostila do Curso de Pós graduação “Economia e Meio Ambiente”. UFPR, Curitiba, 2011.

SANTOS, D., LICKS, L., FALLAVENA, V., AZEVEDO, C., PIRES, M. **Avaliação da Qualidade Analítica na Determinação dos Teores de Cinzas em Amostras de Carvão**. X Salão de Iniciação Científica – PUC RS (Faculdade de Química). Centro de Excelência em Pesquisa sobre Armazenamento de Carbono (CEPAC). 2009. Disponível em: <[http://www.pucrs.br/edipucrs/XSalaoIC/Ciencias\\_Exatas\\_e\\_da\\_Terra/Química/71302-DEISETEIXEIRADOSSANTOS.pdf](http://www.pucrs.br/edipucrs/XSalaoIC/Ciencias_Exatas_e_da_Terra/Química/71302-DEISETEIXEIRADOSSANTOS.pdf)> Acesso: 20 Julho 2012.

SÉKULA, C. R. **Características Químicas do Solo e Produção de Grandes Culturas com Rochagem e Biofertilizantes**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. UNICENTRO, Guarapuava, 2011.

SÉKULA, C. R. **Projeto para Autorização da Utilização Agrícola de Resíduos Sólidos**. Projeto de utilização de resíduos. Guarapuava, 2012.

SEMA 054. **Resolução nº 054/06**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2006.

SERRA, O. C. **Identificação de Oportunidades para Redução das Perdas de Água e Energia em um Sistema de Geração e Distribuição de Vapor**. Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo - Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2006. Disponível em: [http://www.teclim.ufba.br/site/material\\_online/dissertacoes/dis\\_osmar\\_c\\_serra.pdf](http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_osmar_c_serra.pdf) Acessado em: 20 Agosto 2012.

SILVA, E. L. **Controle da poluição do Ar na Indústria Açucareira**. Escola federal de Engenharia de Itajubá. Sociedade dos Técnicos Açucareiros Alcooleiros do Brasil – STAB, 2000.

SIMILAR. **Relatório de Emissões Atmosféricas**. Guarapuava, Junho de 2012

VASCONCELLOS, C.B., LEAL, C.L.D., FRANÇA, M.P., CASTRO, P.F. **Aproveitamento da Cinza de Caldeira na Construção Civil**. Vértices – Publicação Técnico-científica do CEFET Campos – Vol. 6, nº1. Rio de Janeiro, 2004.

WITTMANN, A. L. **Proposta para Tratamento e Destinação dos Resíduos Sólidos Orgânicos do Grupo Santa Maria**. Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização em Gestão Ambiental, Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, 2010.



## APÊNDICE

### A1 – GLOSSÁRIO

**Água desmineralizada:** Água tratada em reatores iônicos para remoção de íons como cálcio, magnésio, sódio, sílica, carbonatos e bicarbonatos. Sem o tratamento de desmineralização a água traria danos aos tubos da caldeira.

**Bag ou big bag:** Grandes sacos de plástico com elevada capacidade e resistência, chegando a armazenar mais de 1 tonelada de produto. Muito utilizado para fornecer produtos e insumos industriais.

**Balão** (tubulão superior): Vaso de pressão que mantém em equilíbrio a água e o vapor saturado. A água é constantemente alimentada e o vapor produzido sai por cima.

**Basculagem:** Processo de limpeza de grelhas basculantes, permitindo a remoção de todo o material aderido no grelhado. As escórias que se formam no grelhado e caem nos cinzeiros são em forma de pó, no entanto se a basculagem não for periódica, ou se haver falta de ar para a queima, haverá formação de “cascões” sobre o grelhado.

**Biomassa:** material de origem vegetal ou animal que pode ser utilizado como combustível, ou seja, fonte de produção de energia. São exemplos de biomassa a madeira (em forma de lenha, cavaco ou serragem), resíduos da agricultura e floresta, bagaço de cana, esterco, entre outros materiais.

**Caldeira:** equipamento gerador de vapor, ou seja, que utiliza energia térmica para vaporizar a água mantendo alguns parâmetros como pressão e vazão, possibilitando seu uso.

**Cavaco:** biomassa, normalmente de eucalipto e pinus, picada entre 0,5 e 10 cm, de forma a melhorar o contato com o ar e otimizar a queima. Ao misturar o cavaco com a serragem, procedimento frequentemente utilizado, ocorre aumento do arraste de partículas com os gases de exaustão, aumento as cinzas da caldeira.

**Cinzas:** Nome genérico ao material não queimado durante o processo de queima. Pode conter algum teor de matéria orgânica em função da queima incompleta. Pode ser chamado de escória (quando retirado no cinzeiro), cinza volante (o que é arrastado pelos gases) ou material particulado (quando emitido através da chaminé).

**Cinzeiro:** Piso da caldeira logo abaixo ou após o grelhado onde podem ser retiradas as cinzas.

**Cogeração de energia:** Utilização do vapor destinado a algum tipo de processamento para geração de energia elétrica em turbogeradores. O vapor não tem destino final de alimentar a turbina, é um aproveitamento de seu fluxo e entalpia para girar uma turbina no percurso para o uso final. O objetivo da cogeração é aumentar a eficiência do sistema, uma vez que na geração de energia termelétrica mais de 60% da energia do combustível é desperdiçada.

**Combustão:** Oxidação da matéria orgânica com um comburente, normalmente ar, gerando dióxido de carbono e água, além de grande quantidade de energia. A combustão, ou queima, é utilizada como fonte primária para aquecimento em praticamente todos os processos produtivos.

**Compostagem:** Tecnologia de controle de decomposição de materiais orgânicos buscando obter, no menor tempo possível, um composto orgânico com propriedades fertilizantes.

**Coque:** Produto restante da destilação seca do carvão, constituído de carbono fixo e cinzas.

**Densidade:** É a relação entre massa e volume, normalmente expressa em  $\text{kg/m}^3$ . No caso da biomassa para queima, a maior densidade pode indicar maior conteúdo de água, sendo considerado parâmetro para controle da qualidade do cavaco. A densidade utilizada no trabalho não deve ser confundida com densidade básica da madeira.

**Depressão da fornalha:** normalmente a fornalha trabalha sob pressão negativa (vácuo) para que o fogo não saia pelas aberturas. Os valores mais comuns são na faixa de -2 a -10 mmCA (milímetros de coluna de água).

**Escória:** Rejeito de natureza inorgânica que se acumula no grelhado após a queima de biomassa. Neste trabalho a escória foi considerada a cinza pesada, ou seja, o conteúdo inorgânico da biomassa que não é arrastado pelos gases (cinza volante), ficando no grelhado (cascão) ou caindo no cinzeiro.

**Excesso de ar:** Quantidade de ar acima da relação estequiométrica. O ar é usado em excesso para reduzir a queima incompleta do combustível, o que aumentaria o consumo deste e também a poluição do ar.

**Fornalha:** Câmara onde ocorre a combustão. Nas caldeiras aquatubulares as fornalhas são envolvidas com tubos cheios de água, onde absorvem a energia da combustão. Os gases quentes, provenientes da combustão, aquecem os equipamentos na seção de gases.

**Fuligem:** Parte das cinzas da caldeira, material parcialmente queimado cujo teor de carbono ainda permite sua queima na caldeira.

**Granulometria do cavaco:** Dimensão (tamanho) do cavaco, sendo importante no processo devido a área superficial. Quanto maior a área superficial mais facilidade haverá para a queima dos voláteis da madeira.

**Grelhado:** Piso da caldeira onde o cavaco é distribuído para queima e os cascões (escória) se depositam.

**Lixiviação:** Processo de remoção de substâncias solúveis, através da água que drena o solo.

**Material particulado:** Cinzas de caldeira que são arrastadas da fornalha com os gases e, apesar dos sistemas para retê-las na seção de gases, escapam pela chaminé.

**Moega:** Estrutura de material refratário com função de receber as cinzas que caem dos ciclones na saída da fornalha.

**Multiciclones:** Equipamentos destinados a reter as partículas de cinzas (material particulado) de caldeira antes que os gases sejam lançados através da chaminé. Os multiciclones retêm estas partículas fazendo os gases passarem por ciclones, onde as particuladas decantam por ação da força centrífuga. As alternativas mais comuns aos multiciclones são: precipitador eletrostático, filtro de mangas e lavador de gases.

**Nutrientes do solo:** elementos químicos fundamentais ao desenvolvimento das plantas. Podem ser divididos em macro (Ca, K, Mg, P e S) e micronutrientes (Zn, Mo, B, Fe, Cu, Cl), sendo absorvidos do solo pelas plantas.

***Pinus taeda*:** Esta é a espécie de pinus mais plantada no Brasil. Segundo a Embrapa adequa-se muito bem ao clima dos estados do Sul do Brasil.

**Queima:** Combustão.

**Resíduos sólidos:** resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem (industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição).

**Seção de gases ou de exaustão:** Percurso seguido pelos gases ao saírem da fornalha. Inclui sistemas de recuperação, reinjeção e retenção de cinzas. Do ponto de vista de aproveitamento energético, a seção de gases permite o pré-aquecimento do ar primário e da água de alimentação da caldeira.

**Sistema de reinjeção de fuligem:** Equipamentos (roscas, válvulas rotativas e ventiladores) destinados a coletar as cinzas grossas (fuligem) na seção de gases e reinjetá-las na fornalha.

**Teor de cinzas:** conteúdo inorgânico do material, geralmente em forma de óxidos. A medição do teor de cinzas é realizada calcinando a amostra a 800°C por 60 minutos. Não deve ser confundido com as cinzas da caldeira, que é uma forma genérica de chamar os rejeitos da queima.

**Turbogerador:** Turbina a vapor acoplada a um gerador com capacidade de gerar energia elétrica.

## A2 – Tabela de Resultados – Influência na Geração de Cinzas

TABELA 16 – RESULTADOS DIÁRIOS DA ANÁLISE DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE CINZAS

DATA	Escória (n° carrinho/ dia)	Bags de cinzas	CO (mg/L)	Velocidade ventilador (%)	Relação Ar /Cavaco	Umidade cavaco (%)	Densidade cavaco (kg/m³)	Consumo específico
24/05/2012	6	6	1514	54,8	1,43	55,5	391	2,2
25/05/2012	6	6	940	56,0	1,38	57,7	387	2,1
26/05/2012	6	6	837	54,9	1,34	56,2	379	2,0
27/05/2012	5	4	653	54,9	1,35	56,5	373	2,0
28/05/2012	6	5	1210	50,2	1,36	55,5	357	2,3
29/05/2012	6	3	930	49,9	1,35	52,1	356	2,2
30/05/2012	6	2	330	42,2	1,27	56,2	349	2,1
31/05/2012	6	2	600	40,4	1,34	55,9	377	2,0
01/06/2012	5	4	465	53,1	1,36	54,7	372	2,2
02/06/2012	7	5	796	53,7	1,34	57,5	375	2,0
03/06/2012	7	7	920	64,6	1,37	57,9	410	1,7
04/06/2012	5	4	1050	55,6	1,34	58,1	408	1,8
05/06/2012	8	6	2400	49,8	1,30	55,9	400	1,8
06/06/2012	6	4	580	53,4	1,31	56,7	379	2,0
07/06/2012	4	5	1760	70,6	1,35	57,4	375	1,8
08/06/2012	4	5	420	51,9	1,27	56,9	367	1,9
09/06/2012	7	5	1060	59,2	1,26	56,7	370	1,9
10/06/2012	2	5	790	65,5	1,31	58,3	383	1,7
11/06/2012	7	6	2500	63,8	1,23	59,9	399	1,6
12/06/2012	5	5	514	56,8	1,35	56,8	387	2,0
13/06/2012	5	4	1450	53,7	1,27	56,7	372	2,0
14/06/2012	6	4	930	54,2	1,28	57,1	371	2,1
15/06/2012	5	3	1078	58,7	1,28	55,3	372	2,0
16/06/2012	6	6	760	56,4	1,22	57,7	374	1,9
17/06/2012	9	5	972	56,3	1,16	57,7	419	1,8
18/06/2012	7	5	1220	56,2	1,26	59,2	407	1,8
19/06/2012	9	2	97	34,9	1,07	57,7	370	2,1
20/06/2012	7	3	330	40,6	1,20	55,0	355	2,3
21/06/2012	7	1	380	33,5	1,05	52,7	344	2,3
22/06/2012	7	3	130	35,5	1,12	49,7	339	2,4
23/06/2012	5	2	233	40,5	1,07	55,7	354	2,2
24/06/2012	7	8	760	63,0	1,10	57,0	379	1,9
25/06/2012	8	3	1198	53,4	1,02	55,7	373	2,0
26/06/2012	6	4	145	38,7	1,03	53,2	327	2,5
27/06/2012	6	2	320	28,7	0,99	49,1	346	2,3
28/06/2012	8	3	105	33,9	1,10	54,7	347	2,5
29/06/2012	9	3	475	40,0	1,11	55,24	368	2,2
30/06/2012	6	3	610	37,9	1,05	55,3	339	2,2

Fonte: Dados de pesquisa, 2012.

### A3 – Resultados da Análise de Cinzas

TABELA 17 – ANÁLISE ELEMENTAR E DE CONTAMINANTES DAS CINZAS (SOLUBILIZADO)

PARÂMETRO	RESULTADO	I.E	UNIDADE	L.Q.	V.M.P.
Arsênio	< 0,01	± 8,2 %	mg As.L <sup>-1</sup>	0,01	0,01
Bário	< 0,5	± 6,0 %	mg Ba.L <sup>-1</sup>	0,5	0,7
Cádmio	0,16	± 0,93 %	mg Cd.L <sup>-1</sup>	0,001	0,005
Chumbo <sup>(2)</sup>	< 0,01	± 2,5 %	mg Pb.L <sup>-1</sup>	0,01	0,01
Cromo Total	< 0,01	± 1,0 %	mg Cr.L <sup>-1</sup>	0,01	0,05
Mercúrio	< 0,001	± 10,0 %	mg Hg.L <sup>-1</sup>	0,001	0,001
Prata <sup>(2)</sup>	< 0,01	± 0,93 %	mg Ag.L <sup>-1</sup>	0,01	0,05
Selênio	< 0,01	± 6,4 %	mg Se.L <sup>-1</sup>	0,01	0,01
Manganês <sup>(1)</sup>	1,87	± 0,9 %	mg Mn.L <sup>-1</sup>	0,01	0,1
Ferro <sup>(1)</sup>	3,22	± 0,92 %	mg Fe.L <sup>-1</sup>	0,005	0,3
Cobre <sup>(2)</sup>	0,38	± 2,5 %	mg Cu.L <sup>-1</sup>	0,05	2,0
Alumínio	0,14	NE	mg Al.L <sup>-1</sup>	0,05	0,2
Sódio	130,0	± 5,9 %	mg Na.L <sup>-1</sup>	1,0	200,0
Zinco <sup>(2)</sup>	0,30	± 1,0 %	mg Zn.L <sup>-1</sup>	0,01	5,0
Fluoretos	0,59	± 4,9 %	mg F .L <sup>-1</sup>	0,1	1,5
Cianetos <sup>(2)</sup>	< 0,005	± 1,2 %	mg CN <sup>-</sup> .L <sup>-1</sup>	0,005	0,07
Fenóis	0,019	± 0,38 %	mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH.L <sup>-1</sup>	0,001	0,01
Cloretos <sup>(1) (2)</sup>	531,4	± 2,6 %	mg Cl <sup>-</sup> .L <sup>-1</sup>	0,5	250,0
Sulfatos <sup>(1) (2)</sup>	566,0	± 0,35 %	mg SO <sub>4</sub> .L <sup>-1</sup>	1,0	250,0
Nitratos <sup>(1)</sup>	0,98	± 2,33 %	mg N-NO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup>	0,01	10,0
Surfactantes	0,194	± 6,1 %	mg MBAS.L <sup>-1</sup>	0,01	0,5
Dureza Total <sup>(2)</sup>	727,3	± 0,32 %	mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup>	1,0	250,0
Sólidos Dissolvidos Totais <sup>(1) (2)</sup>	88.670,0	± 1,1 %	mg.L <sup>-1</sup>	1,0	1.000,0
pH <sup>(1)</sup>	10,0	± 0,12 U pH	U pH	0,1	6,5 a 9,5
Cor	134,0	± 5,8 %	Hz	1,0	15,0
Turbidez <sup>(1)</sup>	10,86	± 5,9 %	UNT	1,0	5,0
Sólidos Totais – ST (103-105 °C) <sup>(1) (2)</sup>	127.790,0	± 1,2 %	mg/L	1,0	NC

Fonte: Recorte da análise realizada por TECLAB, 2012.

TABELA 18 – ANÁLISE ELEMENTAR E DE CONTAMINANTES DAS CINZAS (AMOSTRA BRUTA)

PARÂMETRO	RESULTADO	I.E	UNIDADE	L.Q.	V.M.P.
pH (1:1 – H <sub>2</sub> O) <sup>(1)</sup>	9,0	± 0,12 U pH	U pH	0,1	2 - 12
Densidade	0,49	NE	g.mL <sup>-1</sup>	0,1	---
Carbono Orgânico Total	17,1	± 4,7 %	%	0,1	---
Cádmio	< 1,0	± 0,93 %	mg Cd .kg <sup>-1</sup>	1,0	---
Chumbo <sup>(2)</sup>	5,2	± 2,5 %	mg Pb .kg <sup>-1</sup>	1,0	1000,0
Cromo Total	< 5,0	± 1,0 %	mg Cr .kg <sup>-1</sup>	5,0	100,0
Mercúrio	< 10,0	± 1,2 %	mg Hg .kg <sup>-1</sup>	10,0	100,0
Arsênio	< 10,0	± 8, %	mg As.kg <sup>-1</sup>	10,0	1000,0
Estanho	< 10,0	NE	mg Sn.kg <sup>-1</sup>	10,0	---
Zinco <sup>(2)</sup>	96,3	± 1,0 %	mg Zn .kg <sup>-1</sup>	1,0	---
Níquel <sup>(2)</sup>	11,4	± 0,93 %	mg Ni .kg <sup>-1</sup>	1,0	---
Selênio	< 10,0	NE	mg Se .kg <sup>-1</sup>	10,0	100,0
Prata <sup>(2)</sup>	< 1,0	± 0,93 %	mg Ag .kg <sup>-1</sup>	1,0	---
Antimônio	< 10,0	± 1,9 %	mg Sb .kg <sup>-1</sup>	10,0	1.000,0
Vanádio	< 10,0	± 1,9 %	mg V .kg <sup>-1</sup>	10,0	1.000,0
Bário	< 10,0	± 6,0 %	mg Ba .kg <sup>-1</sup>	10,0	---
Cobalto	< 1,0	± 0,89 %	mg Co .kg <sup>-1</sup>	1,0	1.000,0
Berílio	< 1,0	NE	mg Be .kg <sup>-1</sup>	1,0	100,0

Fonte: Recorte da análise realizada por TECLAB, 2012.

Cont. 18

PARÂMETRO	RESULTADO	I.E	UNIDADE	L.Q.	V.M.P.
Sólidos Totais – ST (103-105 °C) <sup>(1) (2)</sup>	99,0	±1,2%	%	1,0	---
Benzeno	< 0,1	± 0,39%	mg.kg <sup>-1</sup>	0,1	0,5
Tolueno	< 0,1	± 0,74 %	mg.kg <sup>-1</sup>	0,1	---
Etilbenzeno	< 0,1	± 0,89 %	mg.kg <sup>-1</sup>	0,1	---
M/P – Xilenos	< 0,1	± 0,67 %	mg.kg <sup>-1</sup>	0,1	---
O - Xilenos	< 0,1	± 6,4 %	mg.kg <sup>-1</sup>	0,1	---

Fonte: Recorte da análise realizada por TECLAB, 2012.

TABELA 19 – ANÁLISE ELEMENTAR E DE CONTAMINANTES DAS CINZAS (LIXIVIADO)

PARÂMETRO	RESULTADO	I.E	UNIDADE	L.Q.	V.M.P.
Arsênio	< 0,1	± 8,2 %	mg As.L <sup>-1</sup>	0,1	1,0
Bário	< 1,0	± 6,9 %	mg Ba.L <sup>-1</sup>	1,0	70,0
Cádmio	0,08	± 0,93 %	mg Cd.L <sup>-1</sup>	0,01	0,5
Chumbo <sup>(2)</sup>	< 0,1	± 2,5 %	mg Pb.L <sup>-1</sup>	0,1	1,0
Cromo Total	< 0,1	± 1,0 %	mg Cr .L <sup>-1</sup>	0,1	5,0
Cromo Hexavalente	< 0,1	± 1,0 %	mg Cr <sup>+6</sup> .L <sup>-1</sup>	0,1	---
Prata <sup>(2)</sup>	< 0,05	± 0,93 %	mg Ag.L <sup>-1</sup>	0,05	5,0
Mercúrio	< 0,01	± 10,0 %	mg Hg.L <sup>-1</sup>	0,01	0,1
Selênio	< 0,1	± 6,4 %	mg Se .L <sup>-1</sup>	0,1	1,0
Fluoretos	1,39	± 4,9 %	mg F .L <sup>-1</sup>	0,1	150,0
Cianetos <sup>(2)</sup>	< 0,005	± 1,2 %	mg CN.L <sup>-1</sup>	0,002	---
Óleos e Graxas Totais <sup>(1)</sup>	276,9	± 1,2 %	mg.L <sup>-1</sup>	5,0	---
Fenóis	126,6	± 0,38 %	mg C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH .L <sup>-1</sup>	0,001	---
Benzeno <sup>(2)</sup>	< 0,01	± 0,39 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	0,5
Benzo(a)pireno	< 0,01	± 8,1 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	0,07
Cloreto de Vinila	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	0,5
Clorobenzeno	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	100,0
Clorofórmio	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	6,0
1,4 – Diclorobenzeno	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	7,5
1,2 – Dicloroetano	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	1,0
Tetracloroeto de Carbono	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	0,2
2,4,5 – Triclorofenol	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	40,0
2,4,6 – Triclorofenol	< 0,01	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	40,0
Cresol Total	0,9	± 3,0 %	mg.L <sup>-1</sup>	0,01	20,0

Fonte: Recorte da análise realizada por TECLAB, 2012.

TABELA 20 – ANÁLISE DE PRESENÇA DE SALMONELLA E COLIFORMES

PARÂMETRO	RESULTADO	I.E	UNIDADE	L.Q.
<i>Salmonella spp</i>	< 1	NE	UFC/ g	1
Coliformes Termotolerantes	< 1	± 2,0 %	UFC/ g	1

Fonte: Recorte da análise realizada por TECLAB, 2012.

**Abreviaturas:**

L.Q. Limite de Quantificação do Método Utilizado.

I.E: Incerteza Expandida. (95% de Confiança)

V.M.P. Valor Máximo Permitido.

UFC: Unidade Formadora de Colônia.

NMP: Número mais provável.

TABELA 21 – ENSAIO PARA DETECÇÃO DE VÍRUS

PARÂMETRO	RESULTADO	UNIDADE	L.Q.	V.M.P.
Vírus Entéricos	< 1	UFF / g	1,0	---

Fonte: Recorte da análise realizada por TECLAB, 2012.

**Observações:** A amostra analisada apresenta ausência de Vírus, Amostra não Patogênica.

**Vírus pesquisados:** Adenovírus, Rotavírus e vírus do Gênero *Enterovírus*.

**Abreviaturas:** L.Q. Limite de Quantificação do Método Utilizado. / V.M.P. Valor Máximo Permitido.  
UFF Unidade Formadora de Foco

TABELA 22 – BIOENSAIO DE TOXIDADE AGUDA COM *Vibrio fischeri* (SOLUBILIZADO)

Análise	Metodologia	L.Q.	Resultado
Toxicidade aguda com <i>Vibrio fischeri</i>	Luminometria segundo ABNT NBR 15411-1: 2006	1 FT <sub>B</sub>	FT <sub>B</sub> = 2,0 CE <sub>20</sub> = NA CE <sub>50</sub> = 51,65 %

Fonte: Recorte da análise realizada por TECLAB, 2012.

**Observações:** A amostra analisada apresenta toxicidade aguda para *Vibrio fischeri*. **Ausência de Vírus, Amostra não Patogênica.**

FTB = Fator de toxicidade para *Vibrio fischeri*: menor diluição da amostra em que não se observa efeito significativo de inibição de luminescência do organismo indicador (equivalente ao valor de diluição FDBI). FTB = 1 não apresenta toxicidade FTB > 1 a amostra apresenta toxicidade aguda.

**Abreviaturas:** L.Q. Limite de Quantificação do Método Utilizado. / V.M.P. Valor Máximo Permitido. / \* Análises Realizadas “in situ”.

**CE 20** = Concentração efetiva da amostra inibidora de 20% da luminescência do organismo indicador.

**CE 50** = Concentração efetiva da amostra inibidora de 50% da luminescência do organismo indicador.

#### A4 – Imagens das cinzas da Caldeira



FIGURA 24 – CINZAS DA CALDEIRA DISPOSTAS EM BAGS.  
Fonte: Arquivo do Autor.



FIGURA 25 – REDUÇÃO DE CINZAS AO LONGO DA SEÇÃO DE GASES DA CALDEIRA.  
Fonte: WITTMANN, 2010.



## ANEXOS

### ANEXO 01 – PROPRIEDADES E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

TABELA 23 – CLASSIFICAÇÃO DO SOLO DE ACORDO COM O PH

ACIDEZ	pH em solução de CaCl <sub>2</sub>
Acidez muito alta	< 4,3
Acidez alta	4,4, - 5,0
Acidez média	5,1 - 5,5
Acidez baixa	5,6 - 6,0
Acidez muito baixa	6,1 - 7,0
Neutro	7,0
Alcalino	> 7,0

Fonte: TOMÉ JUNIOR (1997 *apud* RONQUIM, 2010).

### ANEXO 02 – PADRÕES DE EMISSÕES GASOSAS (SEMA 054/06)

TABELA 24 – PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA PARA PROCESSOS DE GERAÇÃO DE CALOR OU ENERGIA – DERIVADOS DE MADEIRA

Potência Térmica Nominal <sup>1)</sup> MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm <sup>3</sup>	CO mg/Nm <sup>3</sup>	NO <sub>x</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	SO <sub>x</sub> mg/Nm <sup>3</sup>	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,5	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann <sup>2)</sup>	560	6.000	NA	NA	CO ou MP-total, O <sub>2</sub>	Anual
Entre 0,5 e 2,0		560	3.000	NA	NA		Anual
Entre 2,0 e 10		560	2.500	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 50		400	2.000	500	NA	MP-total, CO, NO <sub>x</sub> e O <sub>2</sub>	Semestral
Entre 50 e 100		200	1.000	500	NA	MP-total, CO, NO <sub>x</sub> e O <sub>2</sub>	Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA	MP-total, CO, NO <sub>x</sub> e O <sub>2</sub>	Contínuo

Fonte: SEMA 054/06 p. 15.

<sup>1</sup> Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO.

<sup>2</sup> Exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia.